



**Mário Rui da
Silva Faria**

**Estudo de propostas para melhoria da eficiência
energética na *Costa Verde***



**Mário Rui da
Silva Faria**

**Estudo de propostas para melhoria da eficiência
energética na *Costa Verde***

Relatório apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizado sob a orientação científica do Doutor Vítor António Ferreira da Costa, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

This work was supported by the projects:
UID/EMS/00481/2019-FCT - FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia; and
CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Centro Portugal Regional Operational Programme (Centro2020), under the PORTUGAL 2020 Partnership Agreement, through the European Regional Development Fund (ERDF)

FCT Fundação
para a Ciência
e a Tecnologia

CENTRO 2020

PORTUGAL
2020

 **UNIÃO EUROPEIA**
Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

O júri

Presidente

Professor Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogal - Orientador

Professor Doutor Vítor António Ferreira da Costa
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Vogal - Arguente Principal

Mestre Jorge Miguel Simões Marinho
Responsável da Divisão Técnica e da Divisão de Energia da Porcelanas da Costa Verde S.A.

Agradecimentos

A conclusão deste relatório de estágio representa o fim de uma das etapas mais importantes da minha vida. Uma etapa que durou 5 anos, cheia de desafios e peripécias, e que foi possível com a força e o apoio de inúmeras pessoas que me acompanharam ao longo de todo este percurso.

Em primeiro, tenho de agradecer a toda a minha família, pelo apoio demonstrado, pela constante disponibilidade mostrada e por nunca terem deixado de acreditar em mim. Um agradecimento especial à minha mãe, pelo apoio incondicional, pela educação e valores transmitidos e ensinados ao longo da vida, pela paciência e pelo carinho, todos elementos essenciais nesta etapa. À tia Gina, pelos conselhos e por ter estado sempre presente em todos os momentos bons e menos bons.

A todos os meus amigos, de longa data e universitários, que nunca deixaram de me dar força e palavras de apoio; sem dúvida, foram essenciais para a conclusão desta etapa. Ao Pedro Morais, ao Fábio Alexandre Silva, ao Nuno Oliveira, ao Fábio Manuel Silva, e a muitos outros, pelos conhecimentos, pela disponibilidade e ajuda prestada.

Ao meu orientador, o professor Vítor Costa pelo apoio, pela constante motivação, pela paciência, pelos ensinamentos transmitidos e por todo o tempo disponibilizado.

A todos os colaboradores da *Costa Verde* por me terem recebido muito bem ao integrarem-me de uma forma inimaginável, sempre cheios de disponibilidade para esclarecimento de dúvidas e constante boa disposição, e terem contribuído para a realização deste relatório.

Ao Luís Vieira, um amigo que ganhei para a vida, pelo constante apoio e paciência, por nunca me abandonar, sempre disponível para esclarecer todas as dúvidas, por me ter orientado e disponibilizado todos os recursos que precisei.

Ao Eng.º Jorge Marinheiro por toda a atenção dedicada e conhecimentos transmitidos, particularmente com a cerâmica, pela orientação científica e pela confiança depositada em mim para a realização deste estágio.

Por fim, agradeço a todos os docentes que me acompanharam no meu percurso escolar, com os conhecimentos transmitidos e me permitiram tornar a pessoa que sou hoje.

Palavras-chave

Eficiência energética, Indústria cerâmica, Porcelana, Secador, Sistema de despoeiramento, Ar comprimido

Resumo

A gestão eficiente da energia é um dos fatores preponderantes numa empresa e, como qualquer outro fator de produção, deve ser gerido continuamente e de forma eficaz. A *Costa Verde* é uma empresa certificada pela norma ISO 50001, estando, por isso, constantemente à procura de novas oportunidades de melhoria para reduzir o consumo de energia. Assim, já foram aplicadas muitas melhorias que revelaram ser importantes na gestão do consumo de energia.

Ao longo do estágio, integrado no programa *Galp 21*, foram avaliadas algumas oportunidades de melhoria com vista ao aumento da eficiência energética da empresa, partindo de três objetivos distintos: o estudo energético da intervenção realizada com a instalação de uma conduta de ar quente no secador do forno de chacota, a apresentação de propostas de melhoria para o sistema de despoeiramento, e o estudo do sistema de ar comprimido aliado à apresentação de propostas de melhoria.

Foi efetuado um balanço energético e mássico no secador do forno de chacota, com o intuito de avaliar os benefícios decorrentes da instalação de uma nova conduta de ar quente. Com os estudos energéticos realizados, foi confirmada a melhoria da eficiência energética após a colocação da conduta, sendo estimada uma redução do consumo de gás natural no secador em 2019 de 46,6 % quando comparado com o ano de 2018.

Para o sistema de despoeiramento foi estudada a substituição dos equipamentos atuais por outros mais eficientes, nomeadamente os motores elétricos, os ventiladores e o sistema de transmissão de energia. A utilização de motores de classes energéticas mais eficientes permitiria uma redução do consumo de energia superior a 3 %, enquanto a alteração de um ventilador combinada com um motor de classe energética IE3, reduziria o consumo energético do sistema de despoeiramento em cerca de 7 %. A alteração do sistema de transmissão de energia para acoplamento direto significaria uma redução do consumo de energia superior a 5 % do consumo energético do sistema de despoeiramento.

Foi estudado e analisado o sistema de ar comprimido (SAC) da *Costa Verde*, sendo apresentadas diversas medidas que permitiriam uma redução do consumo de energia no SAC. A mudança do secador de ar comprimido por refrigeração seria uma medida importante a adotar, pois significaria uma redução do consumo anual de energia superior a 30 % face ao atual secador.

Com a aplicação das medidas sugeridas, a *Costa Verde* reduziria o consumo total de energia em 1,72 %. Trata-se de um valor baixo, contudo os sistemas em estudo representam 8,27 % do consumo total de energia pelo que uma redução de 1,72 % representaria menos 20 % no consumo dos sistemas analisados.

Keywords

Energy efficiency, Ceramic industry, Porcelain, Dryer, Dedusting system, Compressed air

Abstract

An efficient management of energy is one of the most important factors in a company and as any other production factor, must be managed continuously and effectively. *Costa Verde* is a certified company by standard ISO 50001, always looking for new improvement opportunities to reduce energy consumption. Thus, many improvements have already been made that revealed being important in the management of energy consumption at *Costa Verde*.

Throughout the internship, integrated on *Galp 21* program, some improvement opportunities were evaluated with focus in the increase of the energy efficiency, with 3 distinctive goals: the energetic study of intervention related with the installation of a hot air duct in the dryer of the first firing furnace, the presentation of improvement proposals for the dedusting system, and study of the compressed air system followed by the presentation of improvement proposals.

An energy and mass balance was performed in the dryer of the first firing furnace, aiming to the evaluation of the benefits from the installation of the new hot air duct. With the energetic studies realized, the improvement of the energy efficiency after the installation of the new hot air duct was confirmed, being estimated a reduction of natural gas consumption in 2019 will be 46,6 % when compared with the year of 2018.

For the dedusting system, was studied the replacement of the current equipments that comprises the system such as electric motors, fans and energy transmission system. The use of motors with higher efficiency classes would reduce the energy consumption on dedusting system above 3 %, while the replacement of fan combined with a motor of IE3 class, would reduce the energy consumption on dedusting system on 7 %. Regarding the energy transmission system, changing to direct coupling would mean a reduction of energy consumption higher than 5 % of the energy consumption of the dedusting system.

The compressed air system (SAC) of *Costa Verde* was subject of study and analysis, and several actions that would allow to reduce the energy consumption of SAC were presented. The replacement of the compressed air dryer by refrigeration would be an important action to adopt because that would lead to a reduction of the annual energy consumption higher than 30 % compared to the current dryer.

With the application of the suggested actions, *Costa Verde* would reduce the total energy consumption in 1,72 %. This is a low value, however the systems on study represent 8,27 % of the total energy consumption, thus a reduction of 1,72 % would represent less 20 % of the analyzed systems consumption.

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	ix
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e Objetivos	1
1.2. Organização	2
2. Contextualização	5
2.1 Panorama Energético	5
2.1.1 Políticas e Consumos em Portugal	7
2.2 A Cerâmica	10
2.2.1 O Setor em Portugal	10
3. Porcelanas da <i>Costa Verde</i>	15
3.1 Consumos Energéticos	17
3.2 Processo Produtivo	18
3.2.1 Preparação de Pasta	18
3.2.2 Gesso	21
3.2.3 Olaria	22
3.2.4 Contramoldagem	24
3.2.5 Prensagem	25
3.2.6 Secador e Forno de Chacota (F1)	26
3.2.7 Vidragem	27
3.2.8 Forno de Vidrado (F8) e Escolha	28
3.2.9 Decoração e Forno de Decoração (F2)	30
3.2.10 Embalagem e Expedição	31
3.2.11 Oportunidades de Melhoria	32
4. Economia Circular	37
4.1 Indústria Cerâmica	39
4.2 <i>Costa Verde</i>	40
4.2.1 Projeto <i>Minimum</i>	41
5. Secador do Forno de Chacota	43
5.1 Forno de Chacota	43
5.2 Secador	44
5.2.1 Processo de Secagem	46

5.3 Processo de Cálculo	47
5.3.1 Metodologia	48
5.3.2 Balanço Mássico	53
5.3.3 Balanço Energético	54
5.4 Casos de Estudo.....	61
5.4.1 Caso 1: Só Queimador.....	61
5.4.2 Caso 2: Queimador + Conduta Nova de Ar Quente.....	65
5.4.3 Caso 3: Só Conduta Nova de Ar Quente.....	70
5.4.4 Análise de Resultados.....	73
6. Despoeiramento	77
6.1 Sistemas de Ventilação	77
6.1.1 Ventilação Local Exaustora.....	77
6.2 Despoeiramento na <i>Costa Verde</i>	79
6.3 Ventiladores	82
6.3.1 Ventiladores Centrífugos.....	83
6.4 Motores Elétricos	86
6.4.1 Variadores Eletrónicos de Velocidade (VEV)	89
6.5 Sistemas de Transmissão Motor-Ventilador	91
6.5.1 Acoplamento Direto.....	91
6.5.2 Transmissão por Correias	92
6.5.3 Transmissão por Correntes.....	93
6.6 Casos de Estudo.....	94
6.6.1 Variação da Depressão Imposta.....	95
6.6.2 Substituição dos Motores Elétricos	97
6.6.3 Substituição dos Ventiladores.....	101
6.6.4 Substituição do Sistema de Transmissão Motor-Ventilador.....	104
7. Sistema de Ar Comprimido.....	107
7.1 Constituintes de um Sistema de Ar Comprimido	108
7.1.1 Produção	108
7.1.2 Armazenamento	109
7.1.3 Tratamento	110
7.1.4 Distribuição	115
7.2 Sistema de Ar Comprimido na <i>Costa Verde</i>	117
7.2.1 Compressores	118
7.2.2 Secador de Ar Comprimido	123

7.2.3 Filtros	124
7.3 Medidas de Eficiência Energética	125
7.3.1 Local da Instalação do Compressor	125
7.3.2 Redução de Fugas	127
7.3.3 Medidas de Aumento de Eficiência Energética	128
7.3.4 Comparação do Compressor GA 132 VSD vs GA 132	129
7.3.5 Substituição do Secador de Ar Comprimido por Refrigeração	131
8. Conclusões	135
8.1 Propostas de Trabalhos Futuros	136
9. Referências.....	139
Anexo 1	143

Índice de Figuras

Figura 1 - Evolução do total do consumo primário de energia no Mundo [3].	5
Figura 2 - Evolução do total do consumo primário de energia na União Europeia [3].	6
Figura 3 - Fontes de energia (UE) em 2017 [3].	7
Figura 4 - Planeamento do PREn [4].	8
Figura 5 - Indicadores do PREn [4].	8
Figura 6 - Consumo de energia primária em Portugal [6].	9
Figura 7 - Número de empresas e de trabalhadores por subsector da indústria cerâmica Portuguesa em 2014 [11].	11
Figura 8 - Exportações Portuguesas de produtos cerâmicos em 2017 [9].	12
Figura 9 - Porcelanas da <i>Costa Verde</i> [15].	15
Figura 10 - Resumo dos principais marcos da <i>Costa Verde</i> desde a sua fundação.	16
Figura 11 – Consumos energéticos totais da <i>Costa Verde</i> em 2018 por fonte de energia.	17
Figura 12 - Esquema do atomizador.	19
Figura 13 - <i>Big-Bag</i> de pó atomizado.	19
Figura 14 – Pasta plástica extrudida.	20
Figura 15 – Filtro-prensa (esquerda) e extrusora (direita).	20
Figura 16 - Misturador e agitador de gesso.	21
Figura 17 - Processo de criação de um molde (da madre até ao molde).	22
Figura 18 - Enchimento automático: OMEA (esquerda) e máquina de asas (direita).	23
Figura 19 - OMAP 2 (esquerda) e OMAP 3 (direita).	23
Figura 20 – FRHM: Máquina de enchimento de asas sob pressão.	24
Figura 21 - Processo de contramoldagem.	25
Figura 22 - Molde aberto (esquerda) e molde fechado (direita).	26
Figura 23 - Prensa isostática (esquerda) e mesa de acabamento (direita).	26
Figura 24 - Secador de chacota (esquerda) e F1: Forno de chacota (direita).	27
Figura 25 - Vidragem manual (esquerda) e vidragem automática (direita).	28
Figura 26 - Forno de vidrado (F8).	29
Figura 27 - Escolha de branco.	29
Figura 28 - Secção de decoração.	30
Figura 29 - Forno de decoração (F2).	31
Figura 30 – Embalagem.	31
Figura 31 – Armazém de expedição.	32

Figura 32 - Moinhos: grandes consumidores de energia elétrica.	33
Figura 33 - Contramoldagem: motores associados ao processo de extrusão dos blocos a serem conformados.	34
Figura 34 - Mesa de acabamento com consumo elevado de ar comprimido (esquerda) e Mesa de acabamento rotativa (direita).	34
Figura 35 - Economia circular [16].	38
Figura 36 – Projeto <i>Minimum</i> [21].	41
Figura 37 - Forno de chacota (F1).	43
Figura 38 - Ventiladores de circulação do ar.	45
Figura 39 - Caudais mássicos (m) de ar do secador do forno de chacota.	45
Figura 40 - Curva de temperaturas no secador, no início do estágio.	47
Figura 41 - Correntes de entrada e de saída do secador para o 1.º caso de estudo.	49
Figura 42 – Vagona carregada com louça.	51
Figura 43 - Medição da velocidade com um tubo de Pitot [28].	52
Figura 44 - Perfil de velocidade de um escoamento turbulento [29].	53
Figura 45 - Esquema representativo das perdas energéticas por radiação e convecção.	57
Figura 46 - Placa horizontal representativa do caso em estudo ($T_s > T_\infty$) [30].	58
Figura 47 – Antes (esquerda) e após (direita) a nova conduta de ar quente.	65
Figura 48 - Correntes de entrada e de saída do secador para o 2.º caso de estudo.	66
Figura 49 - Correntes de entrada e de saída do secador para o 3.º caso de estudo.	70
Figura 50 - Curvas de temperaturas dos gases ao longo do secador do forno de chacota.	75
Figura 51 - Esquema de instalação de um sistema de ventilação local, adaptado de [31].	78
Figura 52 - Fluxo de ar entre dois pontos [33].	78
Figura 53 - Filtro de mangas, adaptado de [32].	80
Figura 54 – Torre de despoeiramento da <i>Costa Verde</i>	80
Figura 55 – Diferentes tipos de ventiladores [35].	82
Figura 56 - Esquema de um ventilador centrífugo [38].	83
Figura 57 - Classes de eficiência de motores elétricos [41].	88
Figura 58 - Relação entre fator de carga e eficiência de motores elétricos [42].	88
Figura 59 - Rendimentos nominais segundo a norma IEC 60034-30-1, adaptado de [40].	89
Figura 60 - Exemplo de um acoplamento direto motor-bomba [44].	91
Figura 61 - Esquema de duas polias acopladas através de uma correia [44].	92

Figura 62 – Sistema de transmissão por corrente [44].....	94
Figura 63 - Representação da série de equipamentos do sistema de despoeiramento. ..	95
Figura 64 - Variação do consumo energético em função da depressão imposta.....	96
Figura 65 - Gastos médios de um SAC [51].	107
Figura 66 - Tipos de compressores [51].	108
Figura 67 – Fenómeno da coalescência [57].....	113
Figura 68 - Esquema da secagem de ar comprimido por adsorção [54].	114
Figura 69 - Rede de distribuição de ar comprimido em anel [60].	115
Figura 70 - Exemplo de uma rede de distribuição de ar comprimido [60].	116
Figura 71 - Rede de distribuição de ar comprimido com válvulas de fecho (isolamento) [54].	116
Figura 72 - Esquema representativo da configuração do SAC na <i>Costa Verde</i> [61].	117
Figura 73 - Compressor GA 132 VSD.	118
Figura 74 - Diagrama de fluxo de ar e de óleo do compressor GA 132 VSD [62].....	119
Figura 75 - Diagrama de carga do compressor.	120
Figura 76 - Potência vs caudal do compressor GA 132 VSD.	122
Figura 77 - Secador de refrigeração FD 560 [65].	124
Figura 78 - Comparação do diagrama de carga do compressor GA 132 VSD com o compressor GA 132.....	130
Figura 79 – Diagrama de carga do secador de ar comprimido em dois dias da semana.	131

Índice de Tabelas

Tabela 1- Exportações de produtos cerâmicos em 2016 e 2017 (valores em euros) [12].	12
Tabela 2 - Temperaturas para o caso 1.....	62
Tabela 3 - Humidades e velocidades do ar para o caso 1.	62
Tabela 4 - Caudais mássicos para o caso 1.....	63
Tabela 5 – Caudais energéticos das correntes para o caso 1.	64
Tabela 6 - Temperaturas para o caso 2.....	66
Tabela 7 - Humidades e velocidades do ar para o caso 2.	67
Tabela 8 - Caudais mássicos para o caso 2.....	68
Tabela 9 – Caudais energéticos das correntes para o caso 2.	69
Tabela 10 - Temperaturas para o caso 3.....	70
Tabela 11 - Humidades e velocidades do ar para o caso 3.	71
Tabela 12 - Caudais mássicos para o caso 3.....	72
Tabela 13 – Caudais energéticos das correntes para o caso 3.	73
Tabela 14 – 1.º Caso de estudo.....	74
Tabela 15 – 2.º Caso de estudo.....	74
Tabela 16 - Temperaturas e humidades após o secador, e caudal energético de entrada do sistema.	76
Tabela 17 – Comparação do consumo de gás natural entre 2018, 2019 e 2020.....	76
Tabela 18 - Dados técnicos sobre os motores associados aos ventiladores.	81
Tabela 19 - Dados técnicos dos dois ventiladores do sistema de despoeiramento.	82
Tabela 20 - Nível de pressão dos ventiladores [36].	83
Tabela 21 - Tipos de ventiladores centrífugos [36] [37].	84
Tabela 22 – Eficiência máxima dos diferentes tipos de ventiladores centrífugos, adaptado de [36] [37].....	86
Tabela 23 - Poupança de energia pela redução da velocidade [41].....	90
Tabela 24 - Rendimentos prescritos dos equipamentos do sistema de despoeiramento.	95
Tabela 25 - Variação da depressão e potência média horária associada.	96
Tabela 26 - Consumo anual de energia para vários valores da depressão.	97
Tabela 27 - Consumo médio de energia para um motor elétrico do sistema.	97
Tabela 28 - Rendimento de motores elétricos, 45 kW de potência nominal, de 4 polos para diferentes fatores de carga e frequência de 50 Hz.	98
Tabela 29 – Depressão imposta de 11 mbar (para um motor).	99
Tabela 30 - Depressão imposta de 14 mbar (para um motor).	99

Tabela 31 - Depressão combinada de 11 e 17 mbar (para um motor).....	100
Tabela 32 – Dados energéticos para a alteração de um ventilador para a depressão de 11 mbar (para um motor).	102
Tabela 33 - Dados energéticos para a alteração de um ventilador para a depressão combinada de 11 e 17 mbar (para um motor).	102
Tabela 34 - Dados energéticos para a alteração do ventilador e do motor para a depressão de 11 mbar (para um motor).	103
Tabela 35 - Dados energéticos para a alteração do ventilador e do motor para uma depressão combinada de 11 e 17 mbar (para um motor).	103
Tabela 36 - Rendimentos médios dos sistemas de transmissão de energia mecânica [44] [46] [49].....	104
Tabela 37 - Alteração do sistema de transmissão de energia para uma depressão de 11 mbar (para um motor).	105
Tabela 38 - Alteração do sistema de transmissão de energia para uma depressão combinada de 11 e 17 mbar (para um motor).	105
Tabela 39 – Qualidade do ar segundo a norma ISO 8573-1:2010 [58].	111
Tabela 40 - Especificações técnicas do compressor GA 132 VSD [62].	119
Tabela 41 – Produção e potência estimada do compressor GA 132 VSD [63].	122
Tabela 42 - Consumos de energia pelo compressor GA132 VSD.....	123
Tabela 43 - Características do secador de ar comprimido FD 560.....	124
Tabela 44 - Perda de carga (bar) dos filtros DD e PD [61].	125
Tabela 45 - Variação do consumo energético com a temperatura de aspiração [53].	126
Tabela 46 - Fuga de ar comprimido através de orifícios, potência perdida e custo adicional anual estimado [54].....	127
Tabela 47 - Comparação dos consumos energéticos médios de ambos os compressores.	130
Tabela 48 – Potência média horária do secador de ar comprimido.....	132
Tabela 49 - Especificações técnicas dos secadores de ar comprimido, adaptado de [68].	133
Tabela 50 – Constantes para o caso 1.....	144
Tabela 51 - Temperaturas medidas à saída do secador para o caso 1.	144
Tabela 52 – Peso médio na entrada e saída do secador, por hora, para o caso 1.....	144
Tabela 53 - Perdas por convecção pela parede direita para o caso 1.	145
Tabela 54 - Perdas por convecção pela parede esquerda para o caso 1.	146
Tabela 55 - Perdas por convecção pelo teto para o caso 1.....	147

Tabela 56 – Perdas por radiação para o caso 1.....	148
Tabela 57 – Constantes para o caso 2.....	149
Tabela 58 - Temperaturas medidas para o caso 2.....	149
Tabela 59 – Peso médio na entrada e saída do secador, por hora, para o caso 2.....	149
Tabela 60 - Perdas por convecção pela parede direita para o caso 2.	150
Tabela 61 - Perdas por convecção pela parede esquerda para o caso 2.	151
Tabela 62 - Perdas por convecção pelo teto para o caso 2.....	152
Tabela 63 – Perdas por radiação para o caso 2.....	153
Tabela 64 – Constantes para o caso 3.....	154
Tabela 65 - Temperaturas medidas para o caso 3.....	154
Tabela 66 – Peso médio na entrada e saída do secador, por hora, para o caso 3.....	154
Tabela 67 - Perdas por convecção pela parede direita para o caso 3.	155
Tabela 68 - Perdas por convecção pela parede esquerda para o caso 3.	156
Tabela 69 - Perdas por convecção pelo teto para o caso 3.....	157
Tabela 70 – Perdas por radiação para o caso 3.....	158

1. Introdução

O aumento do consumo de energia, de forma a suprir as necessidades de toda a população, leva ao aumento da procura pelas fontes de energia primária. Contudo, o aumento pela procura e consumo irão agravar os atuais problemas ambientais, nomeadamente a poluição atmosférica, o aquecimento global e a destruição da camada do ozono.

Assim, é fundamental que estes problemas ganhem uma projeção ainda maior a nível mundial de modo a serem combatidos. As políticas públicas, nacionais e através de planos da União Europeia, têm em vista formas de preservar os recursos naturais, reduzir o consumo de energia e as emissões para a atmosfera através de maior e melhor controlo do uso da energia, e com a melhoria da eficiência energética.

A eficiência energética aponta para uma utilização de energia mais responsável e para a adoção de medidas que levam a um consumo racional de energia, existindo uma redução de custos e uma diminuição dos impactos ambientais, sem comprometer o que se pretende produzir.

O setor da cerâmica, sendo um consumidor intensivo de energia, essencialmente devido aos processos de cozedura, assume extrema importância no que diz respeito à redução do consumo de energia. As medidas de eficiência energética com maior potencial de melhoria dizem respeito à otimização dos fornos e secadores, da melhoria do isolamento térmico, da redução das perdas térmicas e da recuperação de calor. No entanto, é geralmente na fonte de energia elétrica que se pode encontrar o maior número de oportunidades para reduzir a fatura e os consumos energéticos.

O presente trabalho surge no sentido da necessidade de reduzir os consumos energéticos de uma empresa cerâmica, consumidora intensiva de energia, utilizando conceitos de sustentabilidade e eficiência energética.

1.1. Enquadramento e Objetivos

A realização deste estágio insere-se no programa *Galp 21*, programa que tem por objetivo a identificação de sistemas e comportamentos energéticos racionais, aplicáveis na indústria e edifícios.

Este trabalho assenta em três objetivos principais, distintos entre si, mas em que a energia é o elemento comum:

- O estudo energético e a viabilidade da intervenção realizada com a colocação de uma conduta de ar quente no secador do forno de chacota;
- A apresentação de propostas de melhoria para o sistema de despoeiramento, a sua avaliação em termos de eficiência energética, e os custos de implementação das propostas;
- O estudo do sistema de ar comprimido e apresentação de propostas de melhoria, analisando a sua vertente energética e financeira.

Convém ainda realçar o facto de o estágio contemplar mais um objetivo de estudo, o sistema de iluminação. Contudo, este tema apenas será abordado no relatório final do programa *Galp 21* por não estar concluído à data de entrega deste relatório de estágio.

1.2. Organização

Este relatório encontra-se dividido em 7 capítulos distintos:

- O primeiro capítulo corresponde a uma introdução dos objetivos pretendidos e às atividades desenvolvidas para a sua concretização.
- No segundo capítulo faz-se uma contextualização do panorama energético, em especial do consumo de energia primária no Mundo e em Portugal. É feita uma abordagem à cerâmica e ao setor cerâmico em Portugal.
- O capítulo três é dedicado à empresa *Porcelanas da Costa Verde* sendo feita uma apresentação da empresa, realçando alguns dos seus aspetos mais importantes. São ainda destacados os consumos energéticos da empresa, e é descrito todo o processo produtivo e identificadas oportunidades de melhoria em algumas das secções.
- No quarto capítulo é descrito o conceito de economia circular e como este é relevante para a indústria cerâmica em geral, e para a *Costa Verde* em particular.
- O quinto capítulo aborda o secador do forno de chacota, com uma descrição do forno e do secador. Posteriormente são estabelecidos os balanços mássico e energético, e feita a caracterização dos fluxos mássicos e térmicos associados ao secador. São efetuados três casos de estudo, sendo para cada um deles apresentados os dados relevantes de interpretação para, na última secção do capítulo, ser feita uma análise comparativa desses três casos.
- No capítulo seis é apresentado o sistema de despoeiramento da unidade fabril. É feita uma referência aos diversos tipos de sistemas de ventilação existentes, sendo o foco principal de análise a ventilação local exaustora. A descrição do sistema de

despoeiramento da *Costa Verde* no que diz respeito ao filtro de mangas, ventiladores e respetivos motores é feita na secção seguinte. Antes da apresentação das propostas de melhoria são abordados os ventiladores, os motores elétricos de acionamento dos ventiladores e os sistemas de transmissão de energia motor-ventilador, uma vez que as propostas de melhoria assentam nestes três tópicos. Por fim, são apresentados os casos de estudo para as propostas de melhoria: variação da depressão de aspiração, e alteração dos motores, dos ventiladores e do sistema de transmissão de energia.

- O capítulo sete é dedicado ao estudo do sistema de ar comprimido (SAC), sendo feita a divisão em produção, armazenamento, tratamento e distribuição. É abordado o SAC da *Costa Verde* e feita uma descrição dos seus principais equipamentos, bem como uma estimativa da produção de ar comprimido. São também apresentadas algumas medidas que visam o aumento da eficiência energética do SAC e um estudo comparativo entre os dois compressores existentes. Por fim, a substituição do secador de ar comprimido por refrigeração também é estudada.
- Por último, no capítulo oito, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho realizado e apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros.

2. Contextualização

2.1 Panorama Energético

As relações existentes entre o ambiente e o setor energético são particularmente relevantes. A produção e o consumo de energia são responsáveis, direta e indiretamente, por alguns dos principais impactos negativos da atividade humana sobre o ambiente.

A procura de energia deve aumentar significativamente, impulsionada pela prosperidade dos países em desenvolvimento bem como com o aumento da população e também pelas novas economias emergentes (Figura 1). Apesar do aumento da procura, no ano de 2040 cerca de dois terços da população mundial viverão em países onde o consumo de energia *per capita* será relativamente baixo, destacando assim a necessidade de mais energia. Com isto, os problemas associados às emissões para a atmosfera de gases com efeito de estufa (GEE), bem como de outros poluentes, como o dióxido de carbono, o dióxido de enxofre e os óxidos de azoto será superior mesmo com o aumento da utilização de energias renováveis. Torna-se imperiosa a utilização racional da energia, levando a alterações no comportamento dos consumidores, que deverão ser complementadas com tecnologias que se traduzam numa redução de consumos. Assim, é imprescindível e cada vez mais urgente a redução da dependência de combustíveis fósseis, através do incentivo à transferência para fontes de energia alternativas, limpas e sustentáveis, e da imposição de metas de eficiência energética [1] [2].

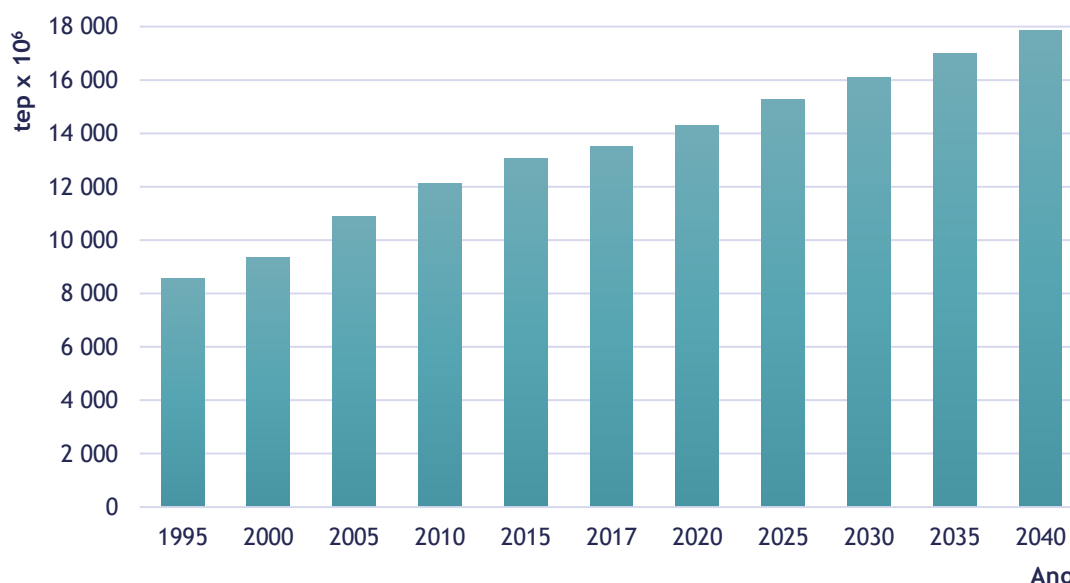


Figura 1 - Evolução do total do consumo primário de energia no Mundo [3].

Em relação ao panorama Europeu (Figura 2), o Pacote “Energia-Clima” (ou Pacote “20-20-20”), adotado em dezembro de 2008 pela União Europeia (UE), estabeleceu para 2020 a redução em 20 % do consumo de energia primária, relativamente aos níveis de 1990. Este plano de ação assenta nas seguintes medidas [2]:

- Reduzir as emissões de GEE da UE, pelo menos 20 % abaixo dos níveis de 1990;
- Promover as fontes renováveis de energia para que 20 % do consumo energético da UE seja proveniente destas;
- Promover a eficiência energética para se obter uma redução de 20 % no consumo de energia primária.

Em outubro de 2014, no âmbito do quadro de ação da UE relativo ao plano “Energia e Clima” para 2030 (que incide sobre os combustíveis fósseis e as emissões de gases com efeito de estufa), foi estabelecida a meta não vinculativa de redução do consumo de energia em pelo menos 27 % em relação às projeções do consumo futuro de energia [2].

A UE importa 53 % de toda a energia que consome, sendo que seis Estados-Membros dependem de um único fornecedor externo para a totalidade das suas importações de gás. Para cumprimento dos objetivos, a UE tem de reduzir a sua despesa com importações de energia que custam cerca de 350 mil milhões de euros por ano, o que faz da UE o maior importador de energia do Mundo [1].

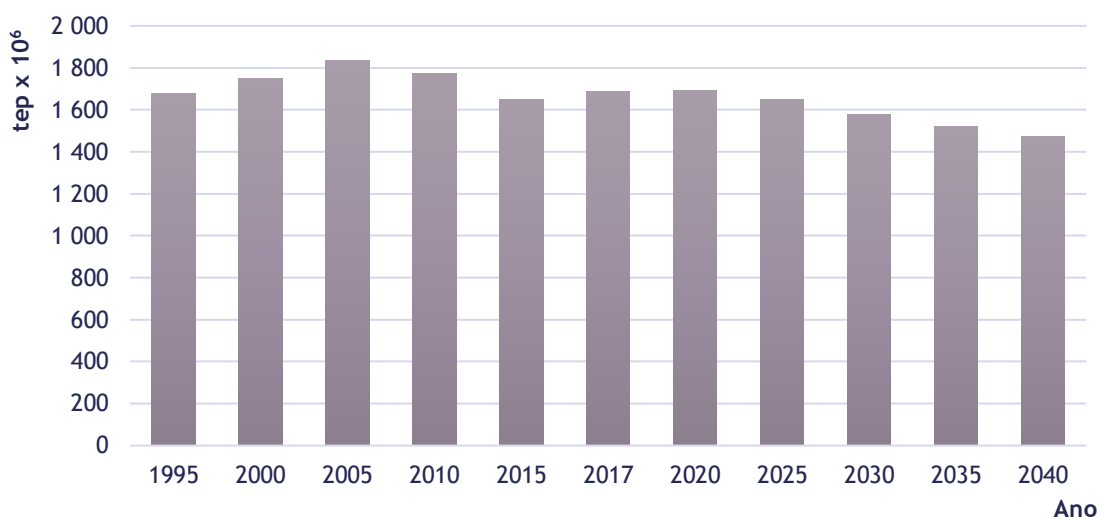


Figura 2 - Evolução do total do consumo primário de energia na União Europeia [3].

Do consumo total de energia primária do ano de 2017 é possível dividir as fontes de energia nas suas diversas categorias (Figura 3). Verifica-se que a utilização de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) é superior a 75 % de todas as fontes de energia utilizadas. Com todas as políticas associadas à redução do aquecimento global

e da não destruição da camada de ozono, é imperativo que o uso de combustíveis fósseis seja drasticamente reduzido.

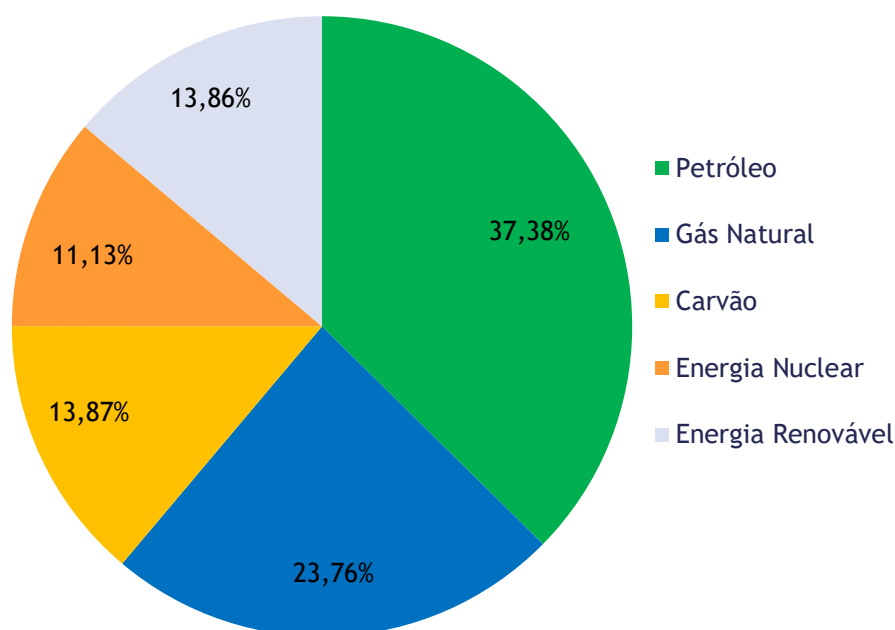


Figura 3 - Fontes de energia (UE) em 2017 [3].

2.1.1 Políticas e Consumos em Portugal

A *Costa Verde* caracteriza-se por ser uma consumidora intensiva de energia estando, por isso, sujeita a um rigoroso controlo por parte do Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia (SGCIE). O SGCIE é aplicado a instalações Consumidoras Intensivas de Energia (CIE) que, no ano civil imediatamente anterior, tenham tido um consumo energético superior a 500 tep/ano, com exceção das instalações de cogeração juridicamente autónomas dos respetivos consumidores de energia, de acordo com o Decreto-Lei n.º 71/2008 de 15 de abril [4].

Este artigo, aliado à alteração referida no Decreto-Lei n.º 68-A/2015 de 30 de abril, refere que “é obrigatória a realização das seguintes auditorias energéticas nas instalações com consumo de energia igual ou superior a 1000 tep/ano, com uma periodicidade de oito anos, sendo que a primeira destas auditorias deve ser realizada no prazo de quatro meses após o registo” e que “as auditorias incidem sobre as condições de utilização da energia, bem como a conceção e o estado da instalação, devendo ainda ser colhidos os elementos necessários à elaboração do Plano de Racionalização do Consumo de Energia (PREn) e à verificação do seu subsequente cumprimento” (Figura 4) [5].

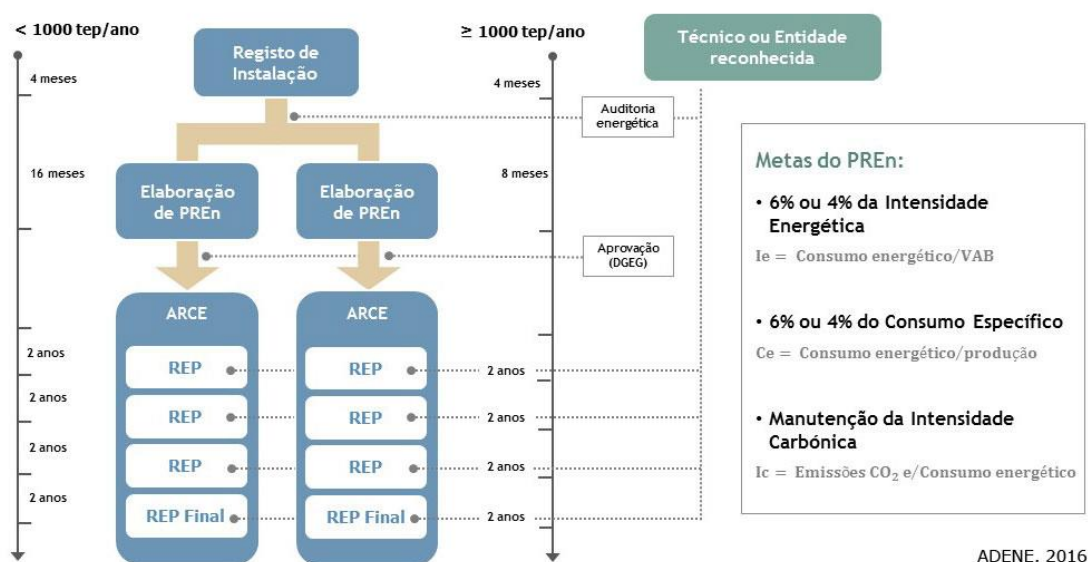


Figura 4 - Planeamento do PREn [4].

Os indicadores do PREn dizem respeito às Intensidades Energética e Carbónica, e ao Consumo Específico de Energia:

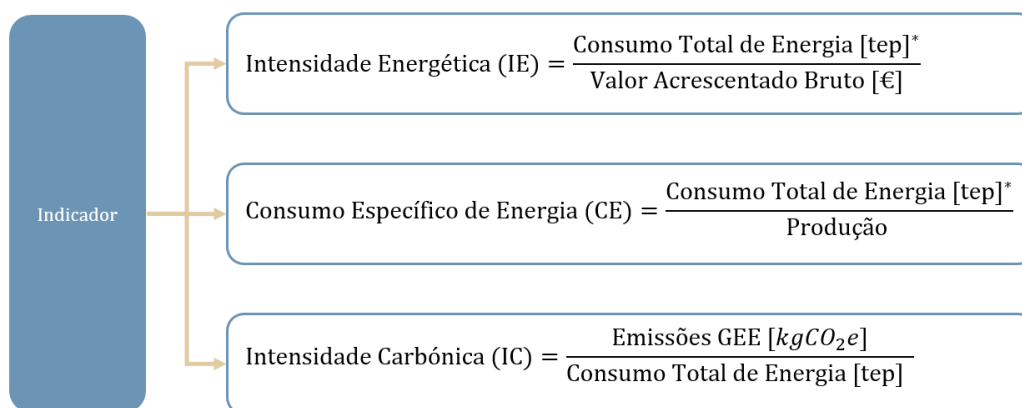


Figura 5 - Indicadores do PREn [4].

*Para efeitos do PREn o consumo total de energia é calculado considerando apenas 50% da energia resultante de resíduos endógenos e de outros combustíveis renováveis.

Os indicadores referidos na Figura 5 estão sujeitos aos seguintes valores:

- A. No mínimo, uma melhoria de 6 % dos indicadores IE e CE, em oito anos;
- B. No mínimo, a manutenção dos valores históricos de intensidade carbónica.

O consumo de energia primária em Portugal estabilizou a partir de 2015, como perceptível na Figura 6, após uma tendência de decréscimo de 2005 até 2014. Para 2020, o PNAEE (Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética) fixa o objetivo geral de redução de 25 % do consumo de energia primária, e um objetivo específico para

a Administração Pública de redução de 30 % relativamente à média do consumo verificada no período entre 2001 e 2005 [2].

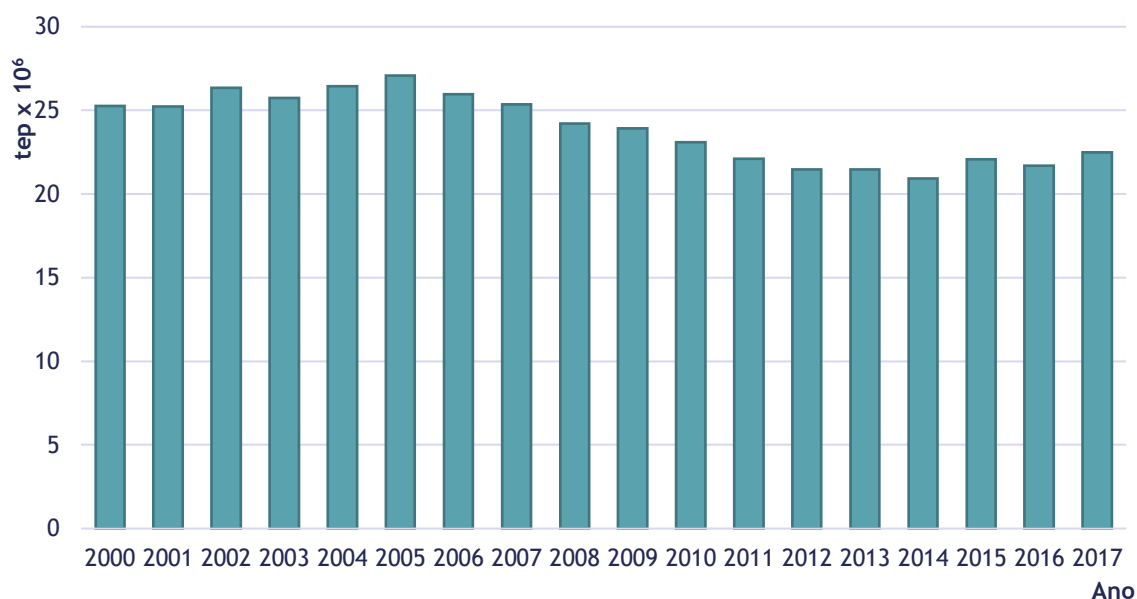


Figura 6 - Consumo de energia primária em Portugal [6].

Portugal tem sido um país líder na ação climática e na promoção de energias de fonte renovável, e é reconhecido por isso a nível internacional, reduzindo 25 % das emissões desde 2005 aliado à incorporação de energias renováveis na produção de eletricidade que aumentou 26 %, atingindo os 54 % em 2017. Em 2016, Portugal assumiu o compromisso de atingir a neutralidade carbónica até 2050, ou seja, alcançar um balanço neutro entre as emissões de GEE e o sequestro de carbono. Isto exige uma redução de emissões superior a 85 % em relação às emissões de 2005 e uma capacidade de sequestro de carbono de 12 milhões de toneladas anuais [7].

No início do ano civil de 2019, o Governo Português apresentou o PNEC 2030 (Plano Nacional Energia e Clima) com o intuito de reduzir a dependência energética do país em relação ao exterior (atualmente, Portugal importa 75 % da energia, mas pretende que essa dependência não ultrapasse os 62 % em 2030) e, tal como referido anteriormente, de assegurar a redução de emissões de gases com efeito de estufa em linha com o objetivo de atingir a neutralidade carbónica em 2050. Para tal, foram estabelecidas algumas metas [7]:

- 45 a 55 % de redução de emissões de GEE em relação a 2005;
- 35 % de eficiência energética;
- 47 % de incorporação de renováveis no consumo final de energia (estando previsto um aumento da capacidade instalada até aos 28,8 GW).

2.2 A Cerâmica

Proveniente do grego *Keramiké*, por sua vez derivada de *Keramos* que significa argila, cerâmica designava inicialmente o trabalho de execução de louça de barro. Surgiu no período de transição do Mesolítico para o Neolítico, com o início do desenvolvimento da agricultura, sendo um produto caracterizado pela forma e resultante da moldagem a frio de uma matéria inorgânica argilosa, posteriormente endurecida pelo calor para adquirir resistência mecânica e cor. Atualmente existem diversos tipos de produtos cerâmicos, variando entre eles a percentagem de cada matéria-prima bem como o tipo de cozedura: terracota (barro cozido), faiança (pasta porosa podendo serem explorados um grande número de decorações, cores e acabamentos), grés (pasta compacta, dura, podendo ser esmaltada ou revestida de película vítrea), porcelana (pasta compacta, branca e dura), entre outros [8].

A indústria cerâmica corresponde à fabricação dos seguintes produtos [9]:

- Pavimentos e revestimentos cerâmicos (azulejos, ladrilhos, mosaicos e placas de cerâmica);
- Cerâmica estrutural (tijolos, telhas e outros produtos para construção);
- Artigos cerâmicos para usos sanitários;
- Artigos cerâmicos de uso doméstico e ornamental (olaria de barro, fabricação de artigos de uso doméstico de faiança, porcelana e grés);
- Produtos cerâmicos refratários, isoladores e peças isolantes em cerâmica, fabricação de outros produtos em cerâmica para usos técnicos e fabricação de outros produtos cerâmicos não refratários.

2.2.1 O Setor em Portugal

A indústria portuguesa da cerâmica caracteriza-se pela antiguidade, tradição e fabrico artesanal. Inicialmente teve como objetivo satisfazer as necessidades do setor da construção. Contudo, com a evolução tecnológica e o desenvolvimento das funcionalidades da cerâmica foi possível identificar um potencial de aplicabilidade noutros setores de atividade industrial. Caracterizada pela crescente aposta no design e na inovação, a indústria apresenta constantemente produtos de alta qualidade. Assim, assume como vantagem competitiva nos mercados externos a diferenciação, a qualidade e o preço dos seus produtos [10].

É, tradicionalmente, um setor de capital intensivo. No entanto, dependendo das especificidades do processo produtivo, é possível identificar subsectores de cerâmica que absorvem mais ou menos mão-de-obra. A Cerâmica Utilitária e Decorativa é o subsector que emprega um maior número de colaboradores, tendo, em 2014, 53 % do total de colaboradores da indústria de cerâmica nacional. A indústria cerâmica Portuguesa representa cerca de 0,5 % do PIB, gerando 1,2 % do volume de negócios da indústria transformadora nacional, e é responsável por empregar cerca de 16.000 trabalhadores em mais de 1.100 empresas. Na Figura 7 está representada a divisão dos setores da indústria cerâmica e o respetivo número de trabalhadores, no ano de 2014 [11] [12].

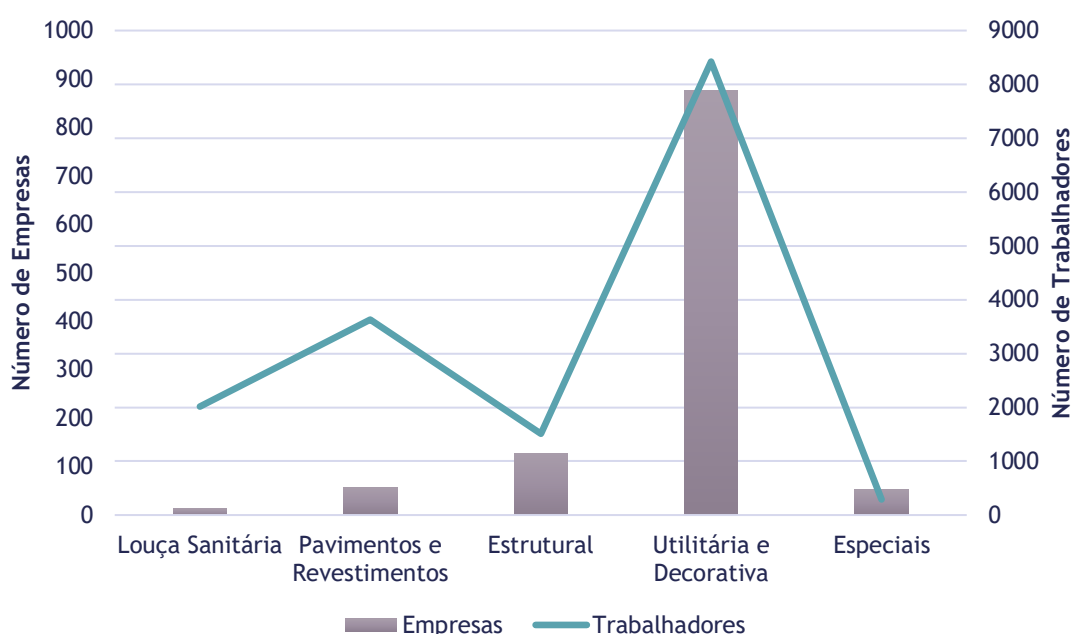


Figura 7 - Número de empresas e de trabalhadores por subsector da indústria cerâmica Portuguesa em 2014 [11].

Relativamente a dados de exportação, os valores mais recentes datam de 2017. Segundo o INE (Instituto Nacional de Estatística), o valor das exportações Portuguesas de produtos cerâmicos superou os 714 milhões de euros, representando uma variação de 1,9 % face ao ano de 2016. As exportações de produtos cerâmicos representaram 1,3 % das exportações totais de bens. Os pavimentos e revestimentos foram os produtos que mais contribuíram para as exportações de cerâmica em 2017 (Figura 8), seguindo-se a cerâmica de mesa em faiança, grés e barro comum, a louça sanitária, a cerâmica de mesa em porcelana, a cerâmica ornamental e as telhas cerâmicas [9] [12].

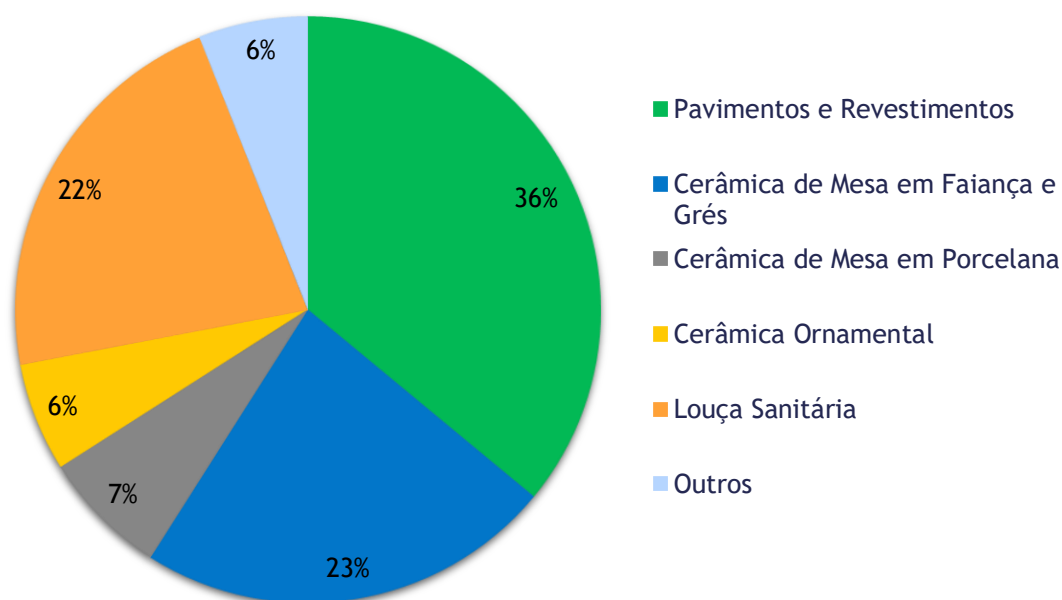


Figura 8 - Exportações Portuguesas de produtos cerâmicos em 2017 [9].

Na Tabela 1 observam-se os principais contribuidores, em termos monetários, dos produtos cerâmicos. Realçar o aumento das exportações na ordem dos 13 milhões de euros.

Tabela 1- Exportações de produtos cerâmicos em 2016 e 2017 (valores em euros) [12].

Produtos Cerâmicos	2016	2017	Tendência
Telhas Cerâmicas	20.950.847	18.539.781	▼
Pavimentos e revestimentos cerâmicos	246.684.683	255.127.246	▲
Aparelhos para usos sanitários	150.860.690	155.11.885	▲
Cerâmica utilitária e decorativa	251.751.813	260.454.958	▲
Outros produtos cerâmicos	31.143.479	24.566.909	▼
Total	701.385.512	714.400.779	▲

No ano de 2017, as exportações Mundiais de produtos cerâmicos atingiram os 46.576 milhões de euros, tendo Portugal posicionado no 11.º lugar do ranking Mundial, com a cerâmica Portuguesa a chegar a 169 mercados internacionais, sendo a França o principal mercado de destino, seguindo-se Espanha, Estados Unidos da América (EUA) e Alemanha.

Considerando os diversos materiais cerâmicos, Portugal obteve o seguinte desempenho [12]:

- 2.º exportador Mundial de cerâmica de uso doméstico não porcelana;
- 6.º exportador Mundial de cerâmica ornamental;
- 7.º exportador Mundial de louça sanitária;
- 9.º exportador Mundial de pavimentos e revestimentos cerâmicos;
- 10.º exportador Mundial de telhas cerâmicas;
- 15.º exportador Mundial de cerâmica de uso doméstico em porcelana.

Já as importações de produtos registaram um valor superior a 157 milhões de euros, variando 17 % face ao período homólogo anterior, sendo que os principais países de origem são Espanha (61 %) seguindo-se China, Itália, Alemanha e Holanda. Estes 5 países representam 90,9 % do valor total das importações Portuguesas de produtos cerâmicos [12].

3. Porcelanas da Costa Verde

A *Costa Verde* é uma empresa localizada em Vagos, distrito de Aveiro, que iniciou a sua atividade em 1992, possuindo uma área coberta de 30.000 m² e uma área disponível superior a 60.000 m², estando atualmente a ser ampliada com a construção de duas novas naves industriais, com cerca de 9.000 m² cada, o que resultará num acréscimo de 40 % face à atual capacidade produtiva. Dedica-se à conceção, desenvolvimento, fabrico e comercialização de louça de mesa cerâmica em porcelana para uso doméstico, hoteleiro e de restauração, sendo que 75 % da produção é exportada para diversos mercados como os EUA, o Japão e a União Europeia, entre outros. No complexo industrial da *Costa Verde* (Figura 9) trabalham cerca de 350 colaboradores [13] [14].



Figura 9 - Porcelanas da Costa Verde [15].

O Sistema de Gestão Integrada da Costa Verde (CVIS) está implementado de acordo com os requisitos das normas:

- ISO 9001 - Sistemas de Gestão da Qualidade;
- ISO 14001 - Sistemas de Gestão Ambiental;
- NP 4397 / OHSAS 18001 - Sistemas de Gestão da Segurança e Saúde no Trabalho;
- SA 8000 - Responsabilidade Social;
- ISO 50001 - Sistema de Gestão de Energia;
- NP 4457 - Investigação Desenvolvimento e Inovação.

Quanto à gestão de resíduos, a *Costa Verde* promove a valorização interna e externa dos seus resíduos, sendo aproximadamente 98 % dos resíduos produzidos valorizados, isto é, são resíduos aproveitados por outras empresas como matérias-primas

dos seus produtos, por exemplo no fabrico de cimento-cola ou de tijolos refratários. Os restantes 2 % são resíduos enviados para aterro [13].

No diagrama da Figura 10 estão resumidos os principais marcos da empresa, quer a nível de certificação quer a nível de desenvolvimento interno.

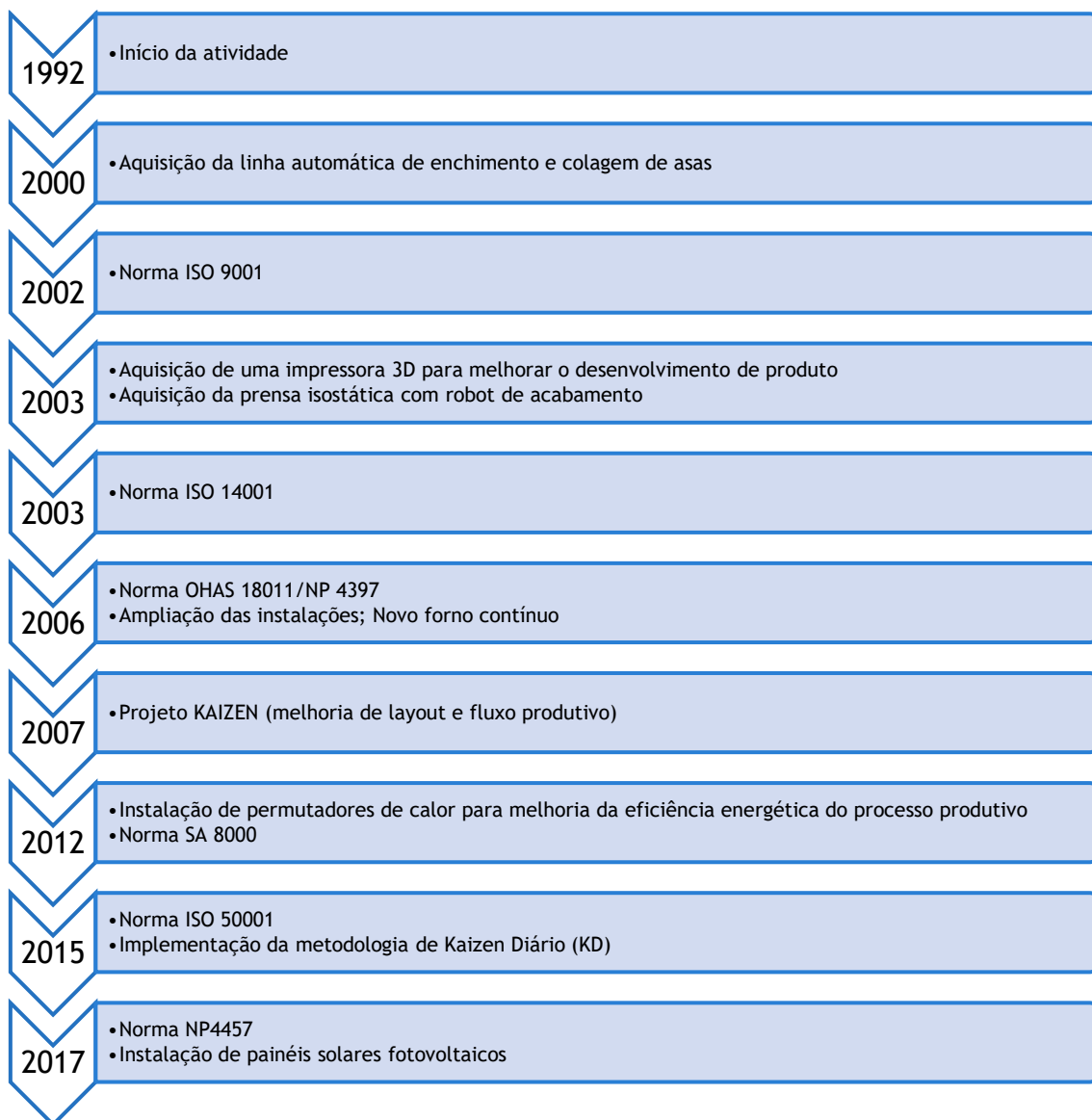


Figura 10 - Resumo dos principais marcos da *Costa Verde* desde a sua fundação.

3.1 Consumos Energéticos

Relativamente aos consumos energéticos totais da *Costa Verde*, estes encontram-se representados na Figura 11, em termos relativos. O gás natural é utilizado principalmente nos fornos e no atomizador, enquanto a energia elétrica é utilizada em todos os sistemas acionados por motores elétricos (ventiladores, compressores, bombas) e em iluminação. Já o gasóleo é utilizado pelo gerador, pela frota automóvel e pelas pás carregadoras para movimentação de matérias-primas.

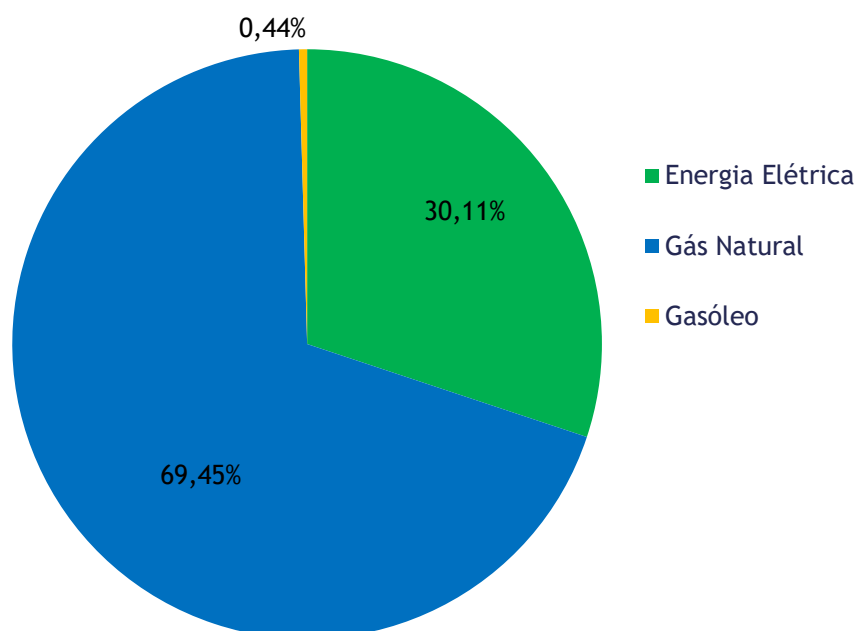


Figura 11 – Consumos energéticos totais da *Costa Verde* em 2018 por fonte de energia.

Os maiores consumidores de energia térmica instalados são:

- Forno túnel de vagonas de vidro;
- Forno túnel de rolos de decoração;
- Forno túnel de vagonas de chacota;
- Atomizador, que produz pó para a prensagem isostática;
- Secador túnel de vagonas de produtos.

No telhado da *Costa Verde* existe uma instalação fotovoltaica produtora de energia elétrica, disponível para uso interno. Em 2018, a energia elétrica consumida proveniente da instalação representou 21,2 % do consumo total de energia elétrica e 6,4 % do consumo total de energia, sendo 90 % da energia produzida consumida internamente. Por questões de confidencialidade, os valores de consumo apresentados estão em percentagem.

3.2 Processo Produtivo

3.2.1 Preparação de Pasta

As matérias-primas a usar na produção de porcelana são armazenadas em silos próprios, devidamente identificados. As matérias-primas que compõem a porcelana são caulinos, argilas, areia e feldspato. Estas são pesadas de acordo com o tipo de pasta a ser produzida (olaria, contramoldagem ou prensagem isostática), sendo que as matérias-primas duras (areia, feldspato) e a argila são submetidas a um processo de moagem, em moinhos Alsings (moinhos de bolas), de modo a existir uma diminuição do tamanho das partículas e ainda com o intuito de misturar uniformemente os diversos materiais. O grau de moagem do moinho é controlado em laboratório, antes de se efetuar a mistura com os caulinos previamente dispersos em turbo-diluidores. A suspensão (pasta) obtida, depois de controlada pelo laboratório, é peneirada e desferrizada, para retirar o ferro que causa defeitos nas peças numa fase mais adiantada do processo produtivo (pintas pretas, por exemplo), e segue diferentes caminhos consoante o fim a que se destina (atomizador, filtro-prensagem e olaria).

3.1.1.1 Atomizador

No atomizador, a pasta líquida é transformada em pó atomizado. A pasta é misturada com um ligante (aditivo para ajudar na prensagem, isto é, na conformação das peças) e é armazenada em tanques, que agitam a pasta intermitentemente, sendo depois bombeada, a uma pressão na ordem dos 19 a 21 bar, para o interior do atomizador. O atomizador funciona em contracorrente, querendo isto dizer que o ar quente é injetado no topo, enquanto a pasta líquida é injetada e pulverizada a meio (passando por uma pastilha com um diâmetro muito pequeno definido em face das propriedades finais desejadas para o pó atomizado) mas em sentido contrário (Figura 12). Isto acontece com um ventilador a fazer a extração do ar quente, puxando-o para baixo e, deste modo, reduz a humidade do pó para uma gama entre 2 a 3 %. As partículas finas são aspiradas juntamente com o ar, passando por um separador ciclónico que faz a extração das partículas finas de pó do ar, sendo estas reintroduzidas no atomizador graças ao auxílio de um ventilador. O pó atomizado é armazenado em *Big-Bags* (Figura 13) de 1.000 kg.

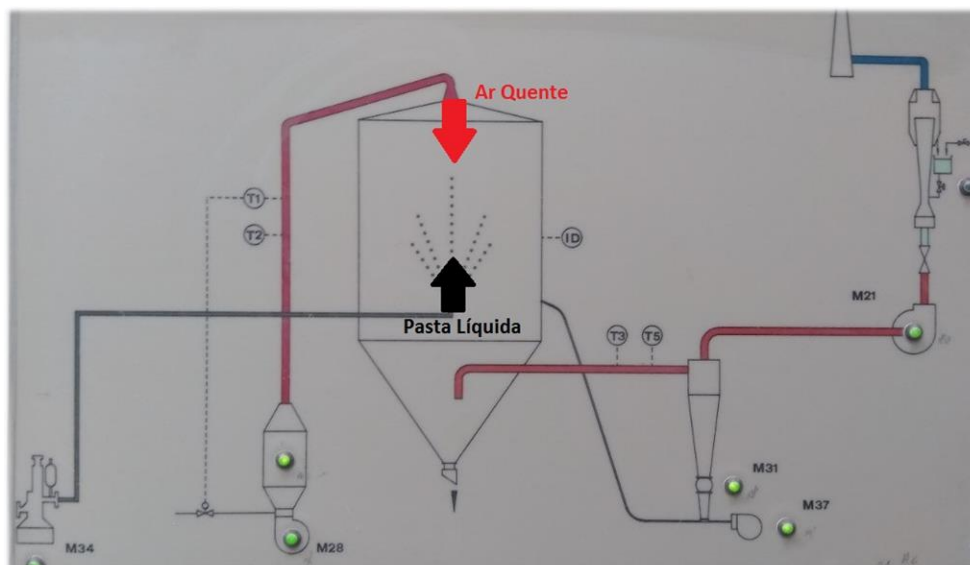


Figura 12 - Esquema do atomizador.

No atomizador já é efetuada uma poupança energética ao ser efetuado um pré-aquecimento ao ar de combustão oriundo de um permutador de calor ar/ar. Desta forma, o ar chega ao queimador a 120 °C, existindo uma poupança no aquecimento do ar.



Figura 13 - Big-Bag de pó atomizado.

Neste subprocesso existe, sobretudo, o consumo de gás natural e de energia elétrica.

3.1.1.2 Filtro-Prensa

No filtro-prensa a pasta líquida é filtro-prensada de modo a retirar a água em excesso. Esta pasta é depois extrudida, resultando em “charutos” (Figura 14) de pasta plástica

com 21 a 23 % de humidade e com a plasticidade necessária para a conformação por contramoldagem.



Figura 14 – Pasta plástica extrudida.

No subprocesso de filtro-prensagem (Figura 15) existe consumo de energia elétrica e de ar comprimido.



Figura 15 – Filtro-prensa (esquerda) e extrusora (direita).

A pasta líquida (barbotina) para a secção da olaria é armazenada em reservatórios próprios, destinados a cada tipo de subprocesso de olaria (reservatório para asas, para enchimento automático/manual e para alta pressão). Uma medida de economia de energia implementada nesta secção foi colocar a agitação destes reservatórios intermitente.

3.2.2 Gesso

Os moldes de gesso utilizados nos processos de produção são todos produzidos na empresa. Primeiramente é feita a mistura de gesso com água, em quantidades adequadas ao processo a que se destina a sua utilização, sendo depois agitado durante um determinado tempo (Figura 16). Posteriormente, vaza-se a calda de gesso nas madres e aguarda-se, durante um período de tempo, que este solidifique. Seguidamente, sofre o processo de acabamento, para rebarbar excessos e eventuais arestas vivas. Por fim, os moldes seguem para uma estufa de secagem antes de irem para a produção. Nesta secção também são produzidos os moldes em resina para as máquinas de enchimento sob pressão, bem como as membranas e almofadas para a prensagem isostática.



Figura 16 - Misturador e agitador de gesso.

O consumo de energia da secção está associado à energia elétrica e ao ar comprimido.

Na Figura 17 estão representadas, de forma sucinta, as principais etapas do processo de produção de moldes de gesso para a produção de asas, onde 1 corresponde à madre, 2 corresponde ao gesso antes de solidificar, visível ao centro do limitador, 3 ao gesso após solidificar (é notória a diferença para 2 em termos de textura) e 4 ao molde final pronto para ir para a máquina de enchimento de asas.

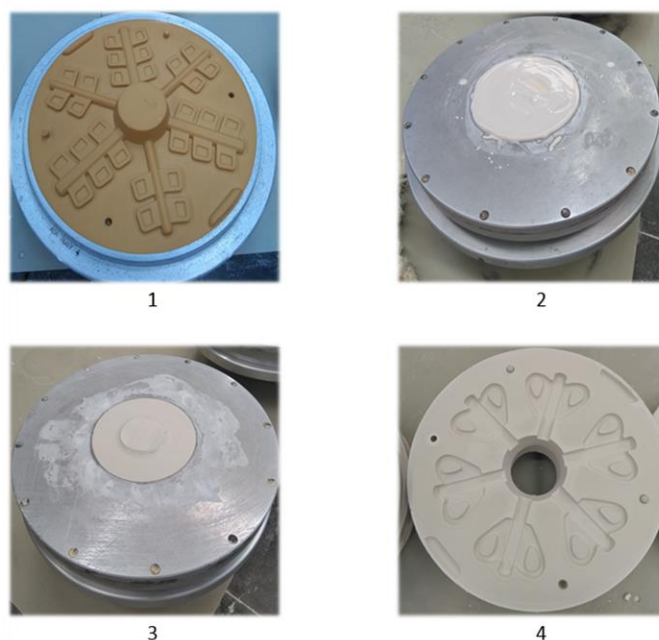


Figura 17 - Processo de criação de um molde (da madre até ao molde).

3.2.3 Olaria

Na secção da olaria, as peças são obtidas através de enchimento por barbotina (pasta líquida). O enchimento pode ser manual, sob pressão ou automático. As peças com formas mais complexas são obtidas por enchimento, sendo a suspensão vazada no interior dos moldes de gesso ou bombeada nos moldes de resina. A suspensão com uma percentagem de água elevada, barbotina, é ajustada previamente no laboratório em termos reológicos para cada um dos processos de enchimento.

Para o enchimento manual e automático (Figura 18) utilizam-se moldes de gesso, que se enchem com barbotina e, após um tempo de espera suficiente para formar a parede, é vazada a barbotina restante. Depois disto, a peça é seca, rebarbada e acabada. Por este processo são feitas as peças ocas abertas.



Figura 18 - Enchimento automático: OMEA (esquerda) e máquina de asas (direita).

Para o enchimento sob pressão (Figura 19) utilizam-se moldes de resina sintética porosa, que se enchem com barbotina sob pressão, que pode ir até 40 bar. A barbotina é injetada quando o molde está fechado, sendo depois desmoldada com o auxílio de ar comprimido e água. O enchimento sob pressão permite reduzir o tempo do ciclo de conformação das peças comparativamente com o processo de enchimento manual ou automático.



Figura 19 - OMAP 2 (esquerda) e OMAP 3 (direita).

Recentemente foi adquirida uma máquina de produção de asas por enchimento sob pressão (Figura 20) cujo princípio de funcionamento é em todo semelhante às OMAPs, sendo o molde também em resina. Aqui a desmoldagem é feita com auxílio de água quente e ar comprimido.



Figura 20 – FRHM: Máquina de enchimento de asas sob pressão.

Na secção da olaria existe consumo de energia elétrica e de ar comprimido. A máquina de enchimento de asas e a OMEA utilizam calor proveniente do permutador de calor ar/ar (o gás natural encontra-se desligado dado que o calor é suficiente).

3.2.4 Contramoldagem

A contramoldagem é o processo de conformação em máquinas Roller. Existem 4 máquinas de contramoldagem na empresa: MR1, MR2, MR3 e NovoRoll. Todas elas apresentam o mesmo princípio de funcionamento. Os “charutos” (pasta plástica) provenientes da extrusora (filtro-prensagem) apresentam a plasticidade necessária para a conformação. Primeiramente os “charutos” passam por um parafuso sem-fim que tritura o material para ser extrudido com o tamanho desejado para conformação. Depois de o bloco ser cortado com o tamanho ideal, segue para as Roller onde ganhará a forma final, sendo para isso pressionado em rotação contra o molde (Figura 21). Antes de sofrer um ligeiro acabamento passa por um secador, o de couro (no caso de peças de dimensões maiores passam por dois secadores: o de couro e o de branco). Os secadores são alimentados pelo ar quente proveniente do permutador de calor ar/ar e, quando este não é suficiente, os secadores dispõem de queimadores próprios que ligam e compensam o calor em falta; quando assim acontece estes consomem gás natural.

Constata-se que existe consumo de energia elétrica, de ar comprimido e, por vezes, de gás natural.



Figura 21 - Processo de contramoldagem.

3.2.5 Prensagem

O pó atomizado é usado na prensagem isostática. Consiste na aplicação de pressão distribuída uniformemente ao pó. Este é aspirado para um reservatório sendo posteriormente injetado para dentro do molde, já fechado, para conformação da peça. O pó entra pelo lado da almofada (representada a vermelho na Figura 22) enquanto o óleo que promove a prensagem se encontra atrás da membrana (a azul na Figura 22). Com a ajuda do óleo e graças às elevadas pressões, o pó é compactado formando uma peça que cai do molde depois da sua abertura, para um tapete que a transporta à mesa de acabamento (Figura 23). O controlo de qualidade das peças é garantido por um operador que verifica se as peças apresentam defeitos. A pressão usada na prensa varia consoante o tipo de peça mas ronda os 250-300 bar e distinguem-se três tipos de pressão: a pressão isostática é a pressão máxima depois do fecho do molde, necessária para a conformação da peça, a pressão de fecho é a pressão necessária que o molde fechado tem que ter para

sustentar a pressão isostática e a pressão de sistema, como o nome indica, é a pressão do sistema em funcionamento.



Figura 22 - Molde aberto (esquerda) e molde fechado (direita).

No total existem 8 prensas que requerem um elevado consumo de energia elétrica e de ar comprimido.



Figura 23 - Prensa isostática (esquerda) e mesa de acabamento (direita).

3.2.6 Secador e Forno de Chacota (F1)

Todas as peças, denominadas peças em cru, seguem para o secador do forno de chacota (Figura 24 esquerda). São colocadas manualmente nas vagonas, com suportes refratários que mantêm a sua resistência a elevadas temperaturas. É no secador que se remove a humidade das peças – idealmente esta deveria ser 0 % à saída do secador. A

duração do ciclo do secador é de 9 h. O secador será abordado numa parte mais adiantada deste relatório.

Posteriormente à secagem, as vagonas vão para o forno de chacota (Figura 24 direita) onde sofrem a cozedura, que confere às peças uma certa resistência mecânica para permitir o seu manuseamento, e a porosidade necessária para a operação de vidragem. Este forno está dividido em três secções de aquecimento, para existir um aquecimento contínuo e não uma elevada diferença entre temperaturas, o que provocaria rachas e quebras nas peças. A primeira secção atinge os 450 °C, a segunda os 720 °C e a terceira, a de maior temperatura, atinge os 1.000 °C. Numa primeira fase, bem no início do forno, existe ar quente, proveniente do secador, para criar uma atmosfera mais quente e evitar o choque térmico nas peças. Na fase final do forno é injetado ar frio pelas laterais e o ar quente é extraído, sendo encaminhado para o permutador ar/água e para o secador de chacota.

Em relação ao consumo de energia, existe um elevado consumo de gás natural, atenuado graças ao ar quente proveniente do permutador de calor ar/ar, além de energia elétrica.



Figura 24 - Secador de chacota (esquerda) e F1: Forno de chacota (direita).

3.2.7 Vidragem

A vidragem consiste num processo de imersão das peças numa suspensão de vidrado transparente com determinada densidade. A peça fica revestida com uma película de vidrado que lhe confere o brilho depois de cozido. Pode ser efetuada de modo manual, com

o operador a fazer todo o processo de vidragem, ou de modo automático (Figura 25). Na vidragem existe o consumo de energia elétrica e de ar comprimido.



Figura 25 - Vidragem manual (esquerda) e vidragem automática (direita).

3.2.8 Forno de Vidrado (F8) e Escolha

Depois de as peças serem vidradas são colocadas em vagonas para irem para o forno de vidrado (Figura 26). É neste forno que as peças ganham a dureza, brancura e translucidez característica da porcelana. O princípio de funcionamento do forno de vidrado (F8) é em tudo semelhante ao forno de chacota (F1). Existem 10 zonas distintas para proporcionar diversos tipos de tratamentos térmicos às peças. As primeiras 3 zonas correspondem a uma zona de aquecimento, onde existe pouca cozedura, com a temperatura a aumentar gradualmente até aos 1.020 °C. As zonas 4 a 8 são as zonas do forno onde a temperatura atinge o seu máximo (1.380 °C). As zonas 9 e 10 são as zonas de arrefecimento, onde é insuflado ar frio pelas laterais e, por cima, é feita a extração de ar quente para fornecimento do permutador ar/ar. Após o final do forno existe uma zona para arrefecer ainda mais as peças de modo a serem manuseáveis pelos operadores na descarga das vagonas. Esta zona divide-se em duas: uma primeira onde existe um ventilador a fazer extração de ar quente e uma segunda onde existe injeção de ar ambiente. O forno de vidrado é o maior consumidor de gás natural da empresa e um dos maiores consumidores de energia elétrica.



Figura 26 - Forno de vidrado (F8).

A louça é escolhida (Figura 27) e classificada em diferentes categorias: primeira, retoque, refugo e partidos, onde as peças de primeira se caracterizam por serem peças sem qualquer defeito, as peças de retoque possuem pequenas imperfeições, que serão manualmente corrigidas, voltando a serem introduzidas no forno F8. Por fim, as peças de refugo apresentam defeitos acentuados e as peças de partidos não são aproveitadas, e vão para reciclagem. Aqui existe consumo de energia elétrica e de ar comprimido.



Figura 27 - Escolha de branco.

3.2.9 Decoração e Forno de Decoração (F2)

A decoração (Figura 28) é a etapa anterior à ida das peças para o forno de decoração, contudo as peças provenientes da máquina de carimbar não precisam de ir para o forno e seguem logo para a secção da embalagem. A decoração pode ser feita através de decalques, por filetagem ou por pistolagem. Na pistolagem, o operador, com auxílio de uma pistola de tinta, pinta as partes adequadas da peça. Já a filetagem consiste na aplicação de um filete de cor na peça, sendo um processo com um grau de complexidade superior. Em relação aos decalques, estes são aplicados na área de interesse das peças pelos operadores. A decoração pode ser de 2 tipos: decoração *onglaze* e decoração *inglaze*. A grande diferença é que *onglaze* apresenta uma maior variedade de cores, mas por sua vez é menos resistente às lavagens.



Figura 28 - Secção de decoração.

Os produtos decorados seguem para o forno de decoração (F2) para sofrerem a última cozedura. Este forno (Figura 29) tem dois tipos de cozeduras: *inglaze*, que chega a uma temperatura de 1.200 °C e permite o amolecimento do vidro e a penetração da decoração no vidrado, o que confere elevada resistência às lavagens e detergentes, e *onglaze*, que chega a uma temperatura de 900 °C sendo que a decoração fica menos resistente pois a temperatura atingida não é suficientemente elevada para a decoração se incrustar no vidrado. O forno de decoração recebe calor (ar quente a cerca de 129 °C) do permutador de calor ar/ar, bem como envia uma parte do calor para o mesmo logo após o início do arrefecimento. O calor recebido serve como ar de combustão nos queimadores, permitindo uma poupança de gás natural. Existe injeção de ar, à temperatura ambiente, pelas laterais do forno. Aqui existe consumo de energia elétrica e elevado consumo de gás natural.



Figura 29 - Forno de decoração (F2).

3.2.10 Embalagem e Expedição

As peças prontas para serem embaladas seguem para a secção da embalagem (Figura 30). O produto é sujeito à escolha final antes de ser enviado para a expedição. É aqui que os rigorosos critérios de qualidade são aplicados para evitar o envio de peças defeituosas. O produto é embalado em caixas de cartão, sendo enviado para o armazém de expedição.



Figura 30 – Embalagem.

O produto final é armazenado no armazém de expedição (Figura 31) para posterior expedição.



Figura 31 – Armazém de expedição.

3.2.11 Oportunidades de Melhoria

3.2.11.1 Processo Produtivo

Nas primeiras duas semanas de estágio foi definido passar pelo menos um dia em cada secção para perceber todo o processo produtivo. Ao longo deste processo de aprendizagem, muito útil e enriquecedor, foram observados alguns problemas existentes que podem ser atenuados de modo a permitir uma poupança energética, uma melhoria nas condições de trabalho e, deste modo, uma maior satisfação dos colaboradores.

Estes problemas, ou oportunidades de melhoria, encontram-se um pouco por todos os setores visitados. Logicamente dependem da quantidade de máquinas existentes, do tipo de trabalho efetuado na secção e do tipo de fonte energética, entre outros. Na primeira secção visitada, a preparação de pastas, foi possível observar e constatar alguns conceitos que seriam interessantes de estudar e melhorar, como uma eventual alteração dos motores do atomizador: apesar de alguns incluírem variador de velocidade, ainda são de uma classe energética pouco eficiente (IE1). Com uma alteração para IE3, eventualmente IE4 (mais eficiente), as perdas energéticas seriam menores. Esta alteração de motores também seria primordial nos 2 moinhos existentes (Figura 32) já que estes trabalham 8-9h por dia, o que ao fim de um ano representa um elevado contributo para a fatura energética e monetária.



Figura 32 - Moinhos: grandes consumidores de energia elétrica.

Na secção do gesso, onde, por exemplo, são produzidos os moldes para as máquinas de contramoldagem e as membranas para as prensas isostáticas, a perceção de eventuais benefícios prende-se com a construção do local. Quer isto dizer que o local pode não ter sido projetado da melhor maneira, pois a sala de modelação tem que ser mantida a uma temperatura inferior a 19 °C, em termos de isolamento, tipo de teto escolhido e tipologia dos vidros. Um estudo de climatização (AVAC) às salas de modelação e de produção de membranas seria adequado para permitir um maior conforto aos trabalhadores e redução do consumo de energia. Relativamente à secção da olaria seria importante manter sempre a mesma temperatura na olaria manual, uma vez que a velocidade de formação da peça junto ao gesso (espessura) varia com a temperatura ambiente e, deste modo, é necessário um maior controlo por parte do operador. Esta medida traria benefícios de maior qualidade nas peças, e poderia ser implementada com o auxílio do permutador de calor ar/ar através de uma conduta proveniente da estufa de secagem da olaria, monitorizando a temperatura desejada. Outra solução seria o reforço do isolamento da máquina de enchimento de asas, com o intuito de reduzir as perdas de calor.

Já no processo de contramoldagem a principal melhoria seria relacionada com os motores existentes. Estes motores de classes pouco eficientes, seriam substituídos por motores IE3 (ou IE4). Contabilizando as 4 máquinas de contramoldagem (Figura 33) existentes, seria oportuno estudar o potencial ganho energético face aos atuais motores de modo a verificar tal ganho.



Figura 33 - Contramoldagem: motores associados ao processo de extrusão dos blocos a serem conformados.

Quando se fala em consumos na prensagem isostática fala-se essencialmente em ar comprimido e em motores elétricos. O acabamento das peças é realizado com o auxílio de ar comprimido, sendo nesta secção que se gasta e desperdiça uma das maiores quantidades de ar comprimido da fábrica. Assim sendo, seria adequado uma melhoria nas mesas de acabamento (Figura 34) substituindo as atuais por mesas rotativas (existentes noutras prensas da fábrica) onde não seria necessário tanto ar comprimido.



Figura 34 - Mesa de acabamento com consumo elevado de ar comprimido (esquerda) e Mesa de acabamento rotativa (direita).

Por fim, no caso dos fornos as oportunidades de melhoria são menores, uma vez que estes já foram intervencionados diversas vezes, estando por isso próximos do seu limite em termos energéticos. Em relação ao secador, o fecho total das laterais para minimizar perdas e tornar o processo de secagem mais eficiente seria uma medida a ter em conta e adequada para um estudo mais aprofundado, uma vez que num espaço fechado as perdas de calor são menores.

As oportunidades de melhoria relacionadas com a intervenção no secador, com a análise do sistema de despoeiramento e com a melhoria do sistema de ar comprimido, não foram mencionadas visto serem alvo de uma análise mais detalhada e fundamentada nos capítulos posteriores.

4. Economia Circular

A economia linear, aliada ao aumento da população mundial, tem causado uma procura crescente por matérias-primas, muitas delas escassas e finitas. Consequentemente, a extração e a utilização destas matérias-primas fazem aumentar o consumo de energia e as emissões de CO₂, que causam um impacto negativo no ambiente [16] [17].

“A economia global funciona à razão de 65 mil milhões de toneladas de materiais extraídos ao ano. Em 2050, será mais do dobro: em média, cada habitante irá usar mais 70 % de materiais do que os necessários em 2005. E com mais consumo, mais emissões de gases com efeito de estufa (GEE), de poluentes para o ar, e de resíduos, desde a extração, ao longo de toda a cadeia de produção, ao consumidor e fim de vida. Metade das emissões de GEE a nível mundial devem -se à produção de materiais básicos e 70 % dos resíduos associados a um produto são gerados antes mesmo de o produto ser utilizado” [18]. Face ao que é dito na Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017, é urgente uma mudança de paradigma dos governantes e das indústrias no que diz respeito aos consumos de bens e vida das matérias-primas. Deste modo, e focando num conceito diferente da economia linear, surge o conceito de economia circular. A economia circular afasta-se do conceito linear de “extração, produção e eliminação”, focando-se na preservação e na minimização de desperdícios.

“Economia Circular é um conceito estratégico que assenta na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia. Substituindo o conceito de fim-de-vida da economia linear, por novos fluxos circulares de reutilização, restauração e renovação, num processo integrado, a economia circular é vista como um elemento chave para promover a dissociação entre o crescimento económico e o aumento no consumo de recursos” [18]. Na prática, a economia circular implica a redução do desperdício ao mínimo. Quando um produto chega ao fim do seu ciclo de vida, os seus materiais são mantidos dentro da economia sempre que possível, podendo ser utilizados uma e outra vez, criando assim mais valor sem requerer a utilização de mais recursos primários [17].



Figura 35 - Economia circular [16].

A economia circular (Figura 35) [16] [17]:

- Promove um modelo económico reorganizado, através da coordenação dos sistemas de produção e consumo em circuitos fechados;
- Caracteriza-se como um processo dinâmico, que exige compatibilidade técnica e económica, mas que também requer enquadramento social e institucional (incentivos e valores);
- Ultrapassa o âmbito e foco estrito das ações de gestão de resíduos, como a reciclagem, visando uma ação mais ampla, desde o redesenho de processos, produtos e novos modelos de negócio, até à otimização da utilização de recursos.

Com a mudança de paradigma para uma economia circular, estima-se que as medidas de prevenção dos resíduos, conceção ecológica e reutilização poderão gerar poupanças líquidas de cerca de 600 mil milhões de euros às empresas da União Europeia (cerca de 8 % do total do seu volume de negócios anual), permitindo ainda uma redução de 2 a 4 % das emissões totais anuais de GEE. Para tal, a economia circular centrar-se-á no “fecho do ciclo” de toda a cadeia desde as seguintes fases [17]:

- Conceção - Com o desenho e projeto, de produtos e serviços para vários ciclos de vida, economicamente viáveis e ecologicamente eficientes;
- Produção - Adoção de processos de produção mais limpos, limitando a utilização de substâncias tóxicas, promovendo a eficiência energética e de materiais, e identificando novas utilizações para subprodutos;

- Distribuição - Organização de serviços de logística para partilha de redes de distribuição, escolhas mais sustentáveis de modos de transporte, bem como preocupações com a utilização de materiais recicláveis;
- Utilização - Melhoria da eficiência energética, maximização da vida útil do produto e otimização da reparação e reutilização;
- Eliminação (reentrada no ciclo) – Dinamização de redes de retoma, reuso ou reciclagem.

4.1 Indústria Cerâmica

A indústria cerâmica tem investido em estratégias de economia circular, nomeadamente na reutilização de telhas e na reciclagem de materiais cerâmicos provenientes de resíduos de construção e demolição, revelando a capacidade deste setor para a ecoinovação. A Associação Europeia da Indústria Cerâmica (*Cerame-Unie*) salienta que a eficiência de recursos requer uma avaliação do ciclo de vida em todas as fases do processo de fabrico do produto, incluindo a durabilidade, tempo de vida útil e redução do consumo de recursos na fase de utilização [19] [20].

No âmbito do ecodesign, que é a “integração sistemática de considerações ambientais no processo de design de produtos”, e com a aplicação do conceito desde o início do processo de desenvolvimento, o perfil ambiental do produto em todas as etapas do seu ciclo de vida é otimizado, nomeadamente na extração de matérias-primas, transporte, fabricação, distribuição, utilização e fim de vida. Relativamente à valorização de resíduos e subprodutos, o CTCV (Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro) tem efetuado diversos ensaios de incorporação de resíduos como lamas de ETAR (Estação de Tratamento de Águas Residuais), resíduos florestais, pó de cerâmicos, entre outros, em materiais cerâmicos do subsector da cerâmica estrutural e pavimentos. Esta incorporação dos resíduos é reduzida para que a valorização não comprometa as propriedades e a qualidade do produto final. A indústria cerâmica é um setor com enorme potencial de incorporação/valorização de resíduos. Com a incorporação destes resíduos, um novo ciclo produtivo é iniciado e, deste modo, estes resíduos passam a recursos (subprodutos) de outras indústrias. O aproveitamento dos subprodutos minimiza a extração de recursos naturais e reduz a acumulação de resíduos. O Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, estabelece requisitos para que substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo possam ser considerados subprodutos e não resíduos, quaisquer substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo cujo principal objetivo não seja a sua

produção. No setor da cerâmica, a APICER (Associação Portuguesa das Indústrias de Cerâmica e de Cristalaria), com a autorização da APA (Agência Portuguesa do Ambiente), permite que os seus associados, que cumpram os critérios exigidos, possam expedir os desperdícios como subproduto e não como resíduo [19] [20].

Estes desperdícios resultam de diversas fases do processo de fabrico de material cerâmico [20]:

- Preparação da mistura cerâmica e aparas resultantes da conformação da pasta antes do processo térmico;
- Partículas e poeiras, recolhidas do sistema de despoeiramento;
- Peças cerâmicas não conformes, após processamento térmico.

Por sua vez, os materiais necessitam de apresentar um destino que incorpore as seguintes atividades [20]:

- Fabrico de pasta cerâmica;
- Fabrico de materiais de construção (cimento, betão, argamassas, agregados);
- Terraplanagens e construção de estradas;
- Pavimentação de áreas desportivas.

Verifica-se que a indústria cerâmica apresenta a capacidade para inovar no processo de fabrico e valorizar resíduos da própria e de outras indústrias, promovendo estratégias de economia circular. Contudo, muitas destas indústrias quando querem colocar em prática as estratégias são confrontadas com obstáculos, legais ou outros, que dificultam esta transição para uma economia circular.

4.2 Costa Verde

No caso concreto da *Costa Verde*, já existem muitos cuidados e preocupações com a temática da economia circular. No ano de 2018, 98 % dos resíduos produzidos foram valorizados, isto é, foram utilizados como matéria-prima noutra indústria ou reintroduzidos no processo interno. Atualmente está em curso o processo de descaracterização de resíduos em subprodutos para apresentação à APA, visto que a *Costa Verde* não é uma empresa associada da APICER.

O caco vidrado, porcelana partida ou com elevados defeitos, serve como matéria-prima para uma empresa que produz tijolos refratários. Já o caco chacoado, material proveniente da primeira cozedura, e as lamas provenientes da ETARI (Estação de Tratamento de Águas Residuais Industriais) são uma matéria-prima para a produção de

pastas cerâmicas (para pavimentos/grés). Os moldes de gesso são usados para produção de cimento-cola, enquanto a água reciclada proveniente dos tratamentos químicos da ETARI é usada para limpeza, na secção do gesso e nos autoclismos das casas de banho. As aparas procedentes da contramoldagem e da prensagem isostática são encaminhadas para os armazéns de matérias-primas, para serem reintroduzidas no processo de preparação de pasta, permitindo uma diminuição do uso de matérias-primas novas.

4.2.1 Projeto *Minimum*

O produto *Minimum* foi desenvolvido como caso de estudo de ecodesign no âmbito do projeto europeu InEDIC (Inovação e Ecodesign para a Indústria Cerâmica), do qual a *Costa Verde* foi empresa associada, com o objetivo de desenvolver materiais de formação de alta qualidade, no âmbito do desenvolvimento sustentável, aplicado ao ecodesign no setor cerâmico, visando o aumento da ecoeficiência dos produtos cerâmicos, contribuindo para a competitividade do setor e para a redução do seu impacto ambiental.



Figura 36 – Projeto *Minimum* [21].

Minimum (Figura 36) é um conjunto de cozinha multifuncional em porcelana, com peças de diversas tipologias que podem ser utilizadas para armazenar alimentos, aquecê-los no forno e microondas e servir à mesa. Integra várias estratégias de ecodesign no seu desenvolvimento e apresenta como principais características a multifuncionalidade, a maior eficiência energética na produção (eliminação de uma operação de cozedura), a minimização do uso de substâncias perigosas e a utilização, em cerca de 90 %, de material reciclado internamente (lamas da ETARI) [21].

5. Secador do Forno de Chacota

Depois da conformação das peças, estas seguem para o secador do forno de chacota que tem como objetivo remover alguma da sua humidade. Como as pastas usadas apresentam alguma quantidade de água, é necessário remover essa água para que durante a cozedura de chacota não ocorram fissuras que danifiquem a peça. Assim, a secagem é um processo fundamental na produção de cerâmica, que está continuamente a ser melhorado de modo a serem reduzidas as quebras por fissuras na chacotagem.

É importante, antes da abordagem ao secador, fazer algumas referências ao forno de chacota para melhor compreensão da importância da secagem.

5.1 Forno de Chacota

O forno de chacota (Figura 37) é onde se dá a primeira cozedura que confere às peças a resistência mecânica necessária para permitir o seu manuseamento, e a porosidade necessária para a operação de vidragem.



Figura 37 - Forno de chacota (F1).

Existem fatores a ter em conta relacionados com a cozedura, tais como: homogeneidade da temperatura no interior do forno, controlo do processo de

aquecimento e do processo de arrefecimento, e ação do calor sobre os corpos cerâmicos através de alterações físicas e químicas [22].

Os fornos devem ser desenhados de modo a otimizar os mecanismos de troca de calor por radiação e convecção, para existir uma maior transferência de calor no menor tempo possível e de modo mais uniforme. Nas áreas de pré-aquecimento do forno, não é aconselhável existirem mudanças bruscas de temperatura para evitar quebras, que durante esta fase são muito comuns. É importante assegurar que a temperatura seja uniforme na área de arrefecimento do forno [23].

Os principais defeitos na cozedura de chacota são [22]:

- Quebra das peças, provocada pela extração muito rápida da humidade na primeira etapa de cozedura;
- Peças manchadas, por condensação do vapor de água com impurezas devido à rapidez de cozedura na primeira etapa;
- Aparecimento de fissuras nos períodos de variação rápida de volume e durante o arrefecimento.

Verifica-se que um dos aspetos mais determinantes para que haja êxito na cozedura está relacionado com a boa secagem dos corpos cerâmicos antes de serem introduzidos no interior do forno [22].

5.2 Secador

O secador do forno de chacota faz parte de um circuito fechado que também engloba o forno de chacota. Fazem parte do sistema do secador 11 ventiladores, com os respetivos motores associados, e 1 queimador. Um dos ventiladores é responsável por fazer a admissão de ar quente, proveniente do forno de chacota, para a combustão no queimador. Sete ventiladores fazem a injeção do ar de admissão, após passagem pelo queimador. Esse ar é introduzido, alternadamente, dentro do secador. Quer isto dizer que o ar é insuflado ora no lado esquerdo ora no lado direito do secador (Figura 38). Dois ventiladores são responsáveis por fazer a extração de ar, um para o forno de chacota e outro para o ambiente exterior (exaustão). O outro ventilador serve para ajudar na combustão do gás, com a introdução de ar no queimador. O secador é aberto em ambas as extremidades e nas laterais, na parte de baixo. Isto faz com que as perdas de calor e a entrada de ar parasita seja elevada, dificultando o processo de secagem e a correta medição dos caudais de ar avaliados.



Figura 38 - Ventiladores de circulação do ar.

O secador apresentava, inicialmente, uma conduta de entrada de ar, e duas condutas de saída, uma de exaustão e outra que irá fazer um pré-aquecimento no início do forno de chacota. No decorrer do estágio foi colocada uma nova conduta de ar quente, passando a serem duas as condutas de entrada de ar. Uma proveniente do forno de chacota e outra do permutador de calor ar/ar (Figura 39).

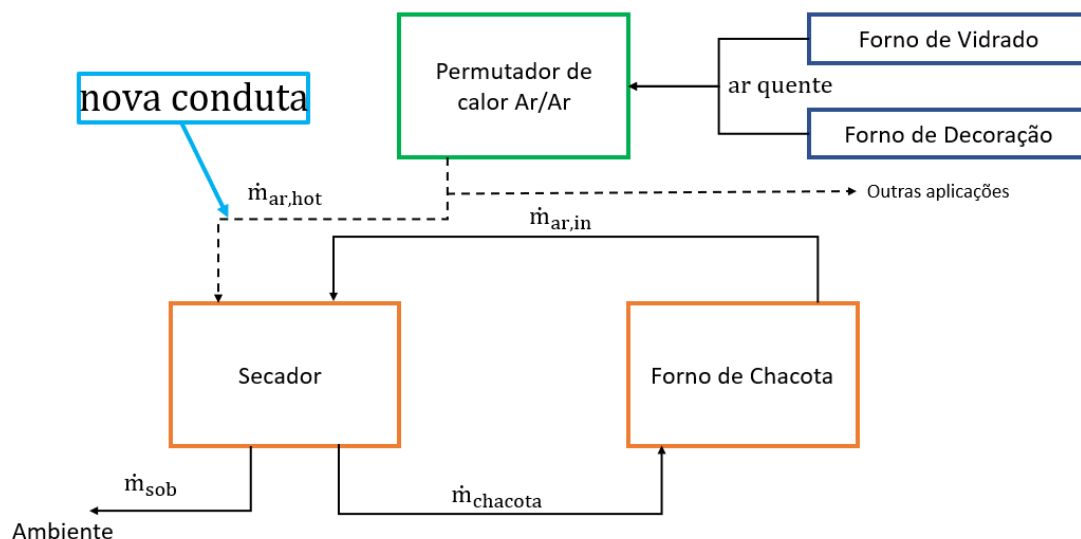


Figura 39 - Caudais mássicos (\dot{m}) de ar do secador do forno de chacota.

É no secador que se remove a humidade das peças – idealmente esta deveria ser 0 % à saída do secador.

5.2.1 Processo de Secagem

Os secadores são equipamentos para a secagem forçada de materiais. O secador existente na *Costa Verde* é um secador de funcionamento contínuo do tipo túnel, no qual a carga e descarga do material ocorre continuamente. É constituído por um túnel, com capacidade para 18 vagonas. Todo o material que passa no secador apresenta o mesmo ciclo de secagem.

O funcionamento da maioria dos secadores cerâmicos está baseado no processo de secagem por convecção, havendo diversos fatores, que influenciam diretamente o processo de secagem [24]:

- Temperatura e humidade relativa do ar de secagem;
- Velocidade da peça a secar;
- Velocidade e direção do fluxo de ar;
- Espessura da peça a secar;
- Quantidade de material a ser seco;
- Distribuição do material na vagona.

O aquecimento ocorre por convecção, por contacto das peças com uma corrente gasosa quente durante o seu lento movimento entre a entrada e a saída do secador. A corrente gasosa quente fornece calor ao material e retira a humidade que se liberta, podendo mover-se no mesmo sentido do material (co-corrente) ou em sentido contrário (contracorrente) [24] [25].

No secador em estudo, o aquecimento é realizado de forma indireta acontecendo em ambiente fechado, com o ar de secagem a ser pré-aquecido no exterior recorrendo a ventilação forçada.

A curva de temperatura de secagem deve ser em crescendo, o que não se verificava no secador (Figura 40).

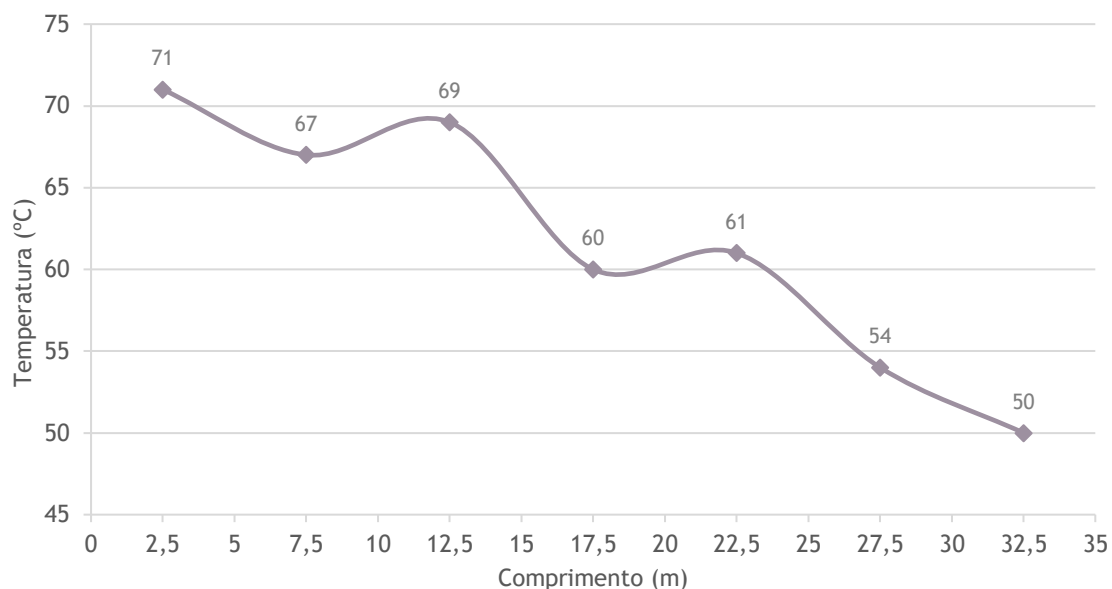


Figura 40 - Curva de temperaturas no secador, no início do estágio.

Relativamente ao consumo de energia elétrica no secador, este é dado pela soma de todos os consumos dos motores elétricos que acionam os sistemas de:

- Recuperação de calor do forno de chacota;
- Recirculação interna;
- Extração de ar;
- Recuperação de calor para o forno de chacota.

5.3 Processo de Cálculo

A análise do secador baseia-se nos balanços mássico e energético, apresentados de seguida.

A Equação (1) representa o princípio de conservação de massa aplicado a um sistema aberto (o secador) em que cada termo representa um caudal mássico [26]:

$$\dot{m}_{in} + \dot{m}_{gen} - \dot{m}_{out} = \dot{m}_{sto} \quad (1)$$

Como não existe geração de massa ($\dot{m}_{gen} = 0$), a entrada e saída global de massa é o somatório das diversas entradas e saídas parciais, e admitindo que o secador opera em regime permanente (não existe variação de propriedades ao longo do tempo), o balanço mássico para o secador fica representado pela equação (2):

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (2)$$

O princípio de conservação de energia para o secador (sistema aberto), dado pela Equação (3), onde \dot{Q} e \dot{W} representam as potências calorífica e mecânica recebidas ou cedidas pelo secador [27]:

$$0 = \dot{Q} + \dot{W} + \sum_{in} (\dot{m} \cdot e) - \sum_{out} (\dot{m} \cdot e) \quad (3)$$

Como não existe fornecimento nem saída de potência mecânica do secador, o termo \dot{W} desaparece da Equação (3).

A entalpia específica (h) de cada uma das correntes envolvidas pode expressar-se como [27]:

$$h - h_{ref} = c_p \cdot (T - T_{ref}) \quad (4)$$

em que h_{ref} é a entalpia específica num estado de referência, podendo tomar-se $T_{ref} = 0^\circ\text{C}$ e $h_{ref} = 0$, T é a temperatura e c_p o calor específico a pressão constante.

A Equação de balanço de energia a aplicar, pode assim ser reescrita:

$$\dot{Q}_{in} + \sum_{in} \dot{m} \cdot h = \dot{Q}_{out} + \sum_{out} \dot{m} \cdot h \quad (5)$$

5.3.1 Metodologia

A metodologia adotada para caracterização das grandezas do secador teve por base as equações anteriores. Assim, foi necessário medir, calcular e quantificar diversas grandezas. Na lista seguinte encontram-se as propriedades e variáveis necessárias para caracterização do secador (para os diversos casos de estudo, apresentados posteriormente). É de realçar que algumas das variáveis de interesse se obtêm a partir das listadas.

- Caudal mássico, \dot{m} [kg/s];
- Temperatura, T [K];
- Pressão, P [Pa];
- Velocidade, v [m/s];
- Área, A [m²];
- Massa volúmica, ρ [kg/m³];
- Massa volúmica do gás natural, $\rho_{gás}$ [kg/Nm³];
- Calor específico a pressão constante, c_p [J/(kg. K)];
- Potência calorífica, \dot{Q} [J/s];

- Entalpia específica, h [J/kg].

Para conhecimento das variáveis a considerar, a Figura 41 permite observar as correntes que influenciam os cálculos do balanço mássico e energético do secador.

Serão abordados 3 casos de estudo distintos para ser obtido o melhor desempenho do secador. O processo de cálculo apresentará todas as variáveis, independente do caso de estudo, sendo dividido para cada uma das correntes envolvidas. Os resultados e a sua análise surgirão após a diferenciação de cada caso.

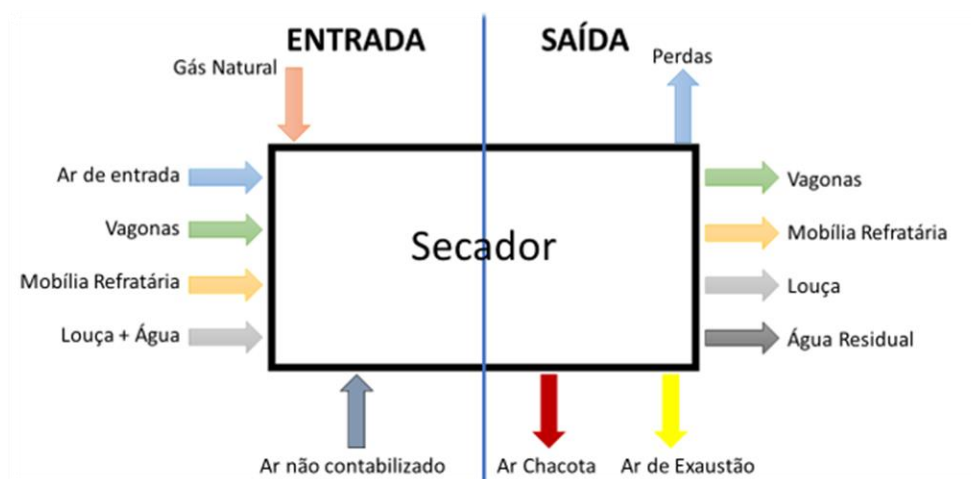


Figura 41 - Correntes de entrada e de saída do secador para o 1.º caso de estudo.

5.3.1.1 Humidade

A relação percentual existente entre a massa de água presente no sólido e a sua massa total corresponde ao teor de humidade. O teor de humidade de um produto é, geralmente, expresso em função da sua massa de matéria seca (X – no caso designado por louça), já que esta permanece constante durante todo o processo de secagem, ao contrário da massa do sólido húmido (W – designado por louça húmida), a qual varia, não sendo assim a mais indicada para expressar o teor de humidade da louça no presente estudo.

Em base seca:

$$X = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{louça}}} \times 100 \text{ [\% (m/m)]} \quad (6)$$

Em base húmida:

$$W = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{louça,húmida}}} \times 100 \text{ [\% (m/m)]} \quad (7)$$

A relação entre as duas humidades, em base seca e em base húmida, e expressas em percentagem é (considerando que X e W estão em percentagem):

$$X = \frac{W}{100 - W} [\% \text{ (m/m)}] \quad (8)$$

$$W = \frac{X}{100 + X} [\% \text{ (m/m)}] \quad (9)$$

A humidade em base seca (X) relaciona: $\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{louça}}$, enquanto a humidade em base húmida (W): $\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{louça, húmida}}$.

A humidade final (X_f), após a secagem, foi determinada através da medida da massa das peças. Foram medidas as massas de 2 peças de duas gamas distintas de produtos, antes da entrada no secador e obteve-se a massa inicial (P_{inicial}). As massas das mesmas peças, já depois de saírem do secador, foram pesadas novamente (P_{secador}) e colocadas numa estufa de secagem 'Binder' (existente no laboratório) de modo a retirar a quantidade de água restante. Após este processo foram novamente medidas as suas massas (P_{final}).

O cálculo da humidade final (em base seca), após a secagem, é obtida da seguinte forma:

$$X_f = \frac{P_{\text{secador}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{final}}} [\% \text{ (m/m)}] \quad (10)$$

A humidade inicial (X_i) é determinada a partir da redução de massa obtida com o processo de secagem do secador do forno de chacota. Foram analisadas as peças de várias vagonas (Figura 42) com o intuito de saber quantas peças de cada gama eram carregadas, com o objetivo de determinar a massa média de entrada e de saída no secador. Com a humidade final e com a diferença de massa entre a entrada e saída do secador, é possível determinar a humidade inicial à entrada do secador.



Figura 42 – Vagona carregada com louça.

5.3.1.2 Temperaturas

As temperaturas nas condutas: de admissão do ar, do ar de exaustão, do ar de introdução no forno de chacota e da nova entrada de ar quente, foram medidas recorrendo a uma sonda de temperatura. Para medição das temperaturas nos termopares foi usado um calibrador digital de temperatura. Também foi efetuada a medição com a sonda de temperatura para confirmação do valor lido pelo calibrador. As restantes medições de temperatura foram efetuadas com o auxílio de um termómetro digital de superfície.

5.3.1.3 Caudais

Os caudais foram medidos de diferentes formas consoante o contexto e o local. O caudal de ar de admissão (combustão) foi calculado a partir do diferencial de pressão existente na tubagem de admissão. Com o valor da pressão lida (ΔP , em mbar) e com a Equação (11), onde C é uma constante (980), fornecida pelo fabricante, obtém-se o valor do caudal volúmico de ar de entrada em m^3/h .

$$\dot{V}_{\text{ar,in}} = C \cdot \sqrt{\Delta P} \quad (11)$$

Para passar para caudal mássico (kg/s), é necessário multiplicar o caudal volúmico pela massa volúmica do ar, à temperatura medida na conduta:

$$\dot{m}_{\text{ar,in}} = \frac{\rho_{\text{ar,in}} \cdot \dot{V}_{\text{ar,in}}}{3600} \quad (12)$$

Os caudais de ar de exaustão e introduzido no forno de chacota, foram calculados a partir de um anemómetro de fio quente (para o primeiro caso de estudo), que fornecia o valor da velocidade. Para os outros dois casos de estudo, os caudais foram medidos com o auxílio de um tubo de Pitot (Figura 43) e de um micromanómetro, sendo necessário efetuar o cálculo da velocidade com base no diferencial de pressão (em Pascal) lido no micromanómetro.

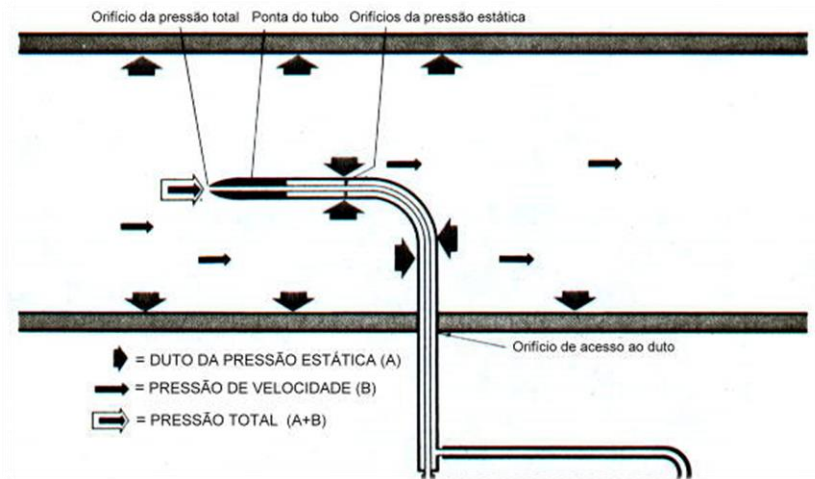


Figura 43 - Medição da velocidade com um tubo de Pitot [28].

A pressão total é a soma da pressão estática com a pressão dinâmica:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{estática}} + P_{\text{dinâmica}} \quad (13)$$

O diferencial de pressão obtido através do tubo de Pitot corresponde à pressão dinâmica, assim:

$$P_{\text{dinâmica}} = P_{\text{total}} - P_{\text{estática}} = \Delta P_{\text{Pitot}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{\text{max}}^2 \quad (14)$$

Reorganizando a Equação anterior, é possível calcular a velocidade máxima do ar (m/s):

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P_{\text{Pitot}}}{\rho}} \quad (15)$$

Segundo a bibliografia [29], com o valor de v_{max} é possível obter o valor da velocidade média (v) dentro da conduta para um escoamento turbulento (Figura 44):

$$v_{\text{max}} \approx v \left(1 + 1,33 \cdot \sqrt{\left(\frac{100 \cdot D \cdot v}{v} \right)^{\frac{1}{4}}} \right) \quad (16)$$

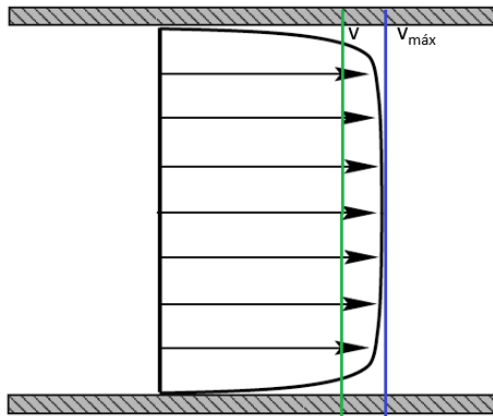


Figura 44 - Perfil de velocidade de um escoamento turbulento [29].

Conhecida a velocidade média (v) e, sabendo a área da secção transversal do escoamento (A_{trans}) e a massa volúmica do fluido (ρ), é possível calcular o caudal mássico (\dot{m}) em kg/s.

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A_{\text{trans}} \quad (17)$$

Para medição dos caudais mássicos relativos às vagonas e à mobília refratária, foram fornecidas as massas de cada um destes componentes. Como entra uma vagona a cada 30 minutos no secador, o caudal mássico horário é obtido multiplicando a massa dos componentes por 2. Relativamente ao caudal mássico de louça e de água que entra no secador, foi analisada uma vagona para determinação da massa inicial da louça húmida. Por fim, o valor do caudal mássico do gás natural foi retirado de uma plataforma de recolha dos consumos energéticos em tempo real (portal da *Galp*).

5.3.2 Balanço Mássico

Através da Figura 41, ficam perceptíveis quais os caudais mássicos de entrada e de saída do secador.

No cálculo dos caudais mássicos do ar de admissão, do ar de ida para o forno de chacota e do ar de exaustão, foi usada a massa volúmica do ar para a respetiva temperatura, sendo negligenciadas a percentagem de gás e de água existente no ar, uma vez que são inferiores ao caudal mássico de ar.

5.3.2.1 Caudal de entrada

O caudal mássico de entrada está associado ao somatório dos caudais mássicos do gás natural, do ar de admissão, do material refratário, das vagonas, da louça, da água contida na louça, do ar quente da nova conduta e do ar não contabilizado (parasita).

5.3.2.2 Caudal de saída

O caudal mássico de saída está associado ao somatório do ar de exaustão, do ar que vai para o forno de chacota, do material refratário, das vagonas, da louça e da água contida na louça que não foi evaporada.

No que diz respeito ao caudal mássico do material refratário, das vagonas e da louça, estes mantêm-se inalterados entre a entrada e a saída.

5.3.3 Balanço Energético

A aplicação do princípio de conservação de energia ao secador, permite a sua simplificação. A partir da Equação (5), é possível determinar o caudal energético associado a cada corrente.

5.3.3.1 Caudal energético de entrada

O caudal energético de entrada é calculado pela Equação (18):

$$\dot{Q}_{in} + \sum_{in} \dot{m} \cdot h = \dot{E}_{total,in} \quad (18)$$

5.3.3.1.1 Gás natural

Para o cálculo do caudal energético do gás natural, Equação (19), ($\dot{E}_{gás}$) é necessário conhecer o seu caudal mássico ($\dot{m}_{gás}$), o poder calorífico inferior (PCI), o calor específico a pressão constante ($C_{p_{gás}}$), a temperatura ($T_{gás}$) e a temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{gás} = \dot{m}_{gás} \cdot \left(\text{PCI} + C_{p_{gás}} \cdot (T_{gás} - T_r) \right) \quad (19)$$

5.3.3.1.2 Ar de admissão

O caudal energético do ar de admissão/combustão ($\dot{E}_{ar,in}$) é calculado a partir do caudal mássico do ar de entrada ($\dot{m}_{ar,in}$), do calor específico a pressão constante do ar ($C_{p,ar,in}$), da temperatura do ar ($T_{ar,in}$) e da temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{ar,in} = \dot{m}_{ar,in} \cdot C_{p,ar,in} \cdot (T_{ar,in} - T_r) \quad (20)$$

5.3.3.1.3 Ar quente de entrada

O caudal energético do ar quente de entrada ($\dot{E}_{ar,hot}$), referente à colocação nova da conduta, é calculado a partir do caudal mássico de ar quente de entrada ($\dot{m}_{ar,hot}$), do calor específico a pressão constante do ar ($C_{p,ar,hot}$), da temperatura do ar quente ($T_{ar,hot}$) e da temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{ar,hot} = \dot{m}_{ar,hot} \cdot C_{p,ar,hot} \cdot (T_{ar,hot} - T_r) \quad (21)$$

5.3.3.1.4 Louça na entrada

A louça é dividida em duas componentes: louça seca (denominada louça) e água. O caudal energético referente à louça na entrada é calculado a partir da Equação (22), sabendo o caudal mássico de louça ($\dot{m}_{louça,in}$), o calor específico a pressão constante da louça ($C_{p,louça,in}$), a temperatura da louça ($T_{louça,in}$) e a temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{louça,in} = \dot{m}_{louça,in} \cdot C_{p,louça,in} \cdot (T_{louça,in} - T_r) \quad (22)$$

Já o caudal energético referente à água presente na louça é calculado a partir da humidade inicial (X_{in}), do caudal mássico de louça ($\dot{m}_{louça,in}$), do calor específico a pressão constante da água ($C_{p,água,in}$), da temperatura da água ($T_{água,in}$) e da temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{água,in} = X_{in} \cdot \dot{m}_{louça,in} \cdot C_{p,água,in} \cdot (T_{água,in} - T_r) \quad (23)$$

5.3.3.1.5 Vagonas na entrada

O caudal energético associado às vagonas na entrada é calculado a partir do caudal mássico de vagonas na entrada (\dot{m}_{vag}), do calor específico a pressão constante das vagonas ($C_{p,vag,in}$), da temperatura das vagonas ($T_{vag,in}$) e da temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{vag,in} = \dot{m}_{vag} \cdot C_{p,vag,in} \cdot (T_{vag,in} - T_r) \quad (24)$$

5.3.3.1.6 Mobília refratária na entrada

Em relação ao caudal energético associado à mobília na entrada ($\dot{E}_{mob,in}$), este é calculado a partir da Equação (25), sendo necessário conhecer o caudal mássico de mobília refratária (\dot{m}_{mob}), o calor específico a pressão constante da mobília refratária ($C_{p_{mob,in}}$), a temperatura ($T_{mob,in}$) e a temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{mob,in} = \dot{m}_{mob} \cdot C_{p_{mob,in}} \cdot (T_{mob,in} - T_r) \quad (25)$$

5.3.3.1.7 Ar não contabilizado/Ar Parasita

Pelo balanço mássico, existe ar que não foi contabilizado, pelo que é necessário fazer a sua inclusão no balanço energético. Assim, o caudal energético do ar não contabilizado ($\dot{E}_{outros,in}$) é calculado a partir do caudal mássico de ar ($\dot{m}_{outros,in}$), do calor específico a pressão constante do ar ($C_{p_{outros,in}}$), da temperatura do ar ($T_{outros,in}$) e da temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{outros,in} = \dot{m}_{outros,in} \cdot C_{p_{outros,in}} \cdot (T_{outros,in} - T_r) \quad (26)$$

5.3.3.2 Caudal energético de saída

O caudal energético de saída é dado pela Equação (27):

$$\dot{Q}_{out} + \sum_{out} \dot{m} \cdot h = \dot{E}_{total,out} \quad (27)$$

5.3.3.2.1 Perdas energéticas pelas paredes

A transferência de calor associada às perdas pelas paredes do secador ocorre por convecção, radiação e condução (Figura 45).

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = \dot{Q}_{perdas} \quad (28)$$

Foram feitas medições da temperatura exterior das paredes e do teto do secador, em cada módulo, para, posteriormente, calcular as perdas de calor.

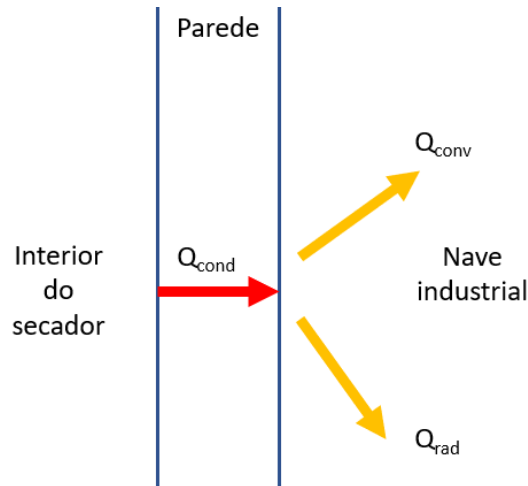


Figura 45 - Esquema representativo das perdas energéticas por radiação e convecção.

Convecção

O calor transferido por convecção é dado por [30]:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \bar{h} \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (29)$$

Para o cálculo do coeficiente médio de transferência de calor por convecção (\bar{h}) é necessário calcular outros parâmetros, apresentados de seguida. As correlações empíricas para o cálculo do número de Nusselt (Equação (30)) em convecção natural, no caso de uma superfície vertical, são [30]:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h} \cdot L}{k} = C \cdot Ra_L^n \quad (30)$$

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty}) \cdot L^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (31)$$

onde:

- k : condutividade térmica do fluido [$W/(m \cdot K)$];
- L : dimensão característica [m];
- \bar{h} : coeficiente médio de transferência de calor por convecção [$W/(m^2 \cdot K)$];
- \overline{Nu}_L : número de Nusselt;
- Ra_L : número de Rayleigh;
- Pr : número de Prandtl;
- β : coeficiente de expansão volumétrico [K^{-1}];
- T_s : temperatura da superfície exterior [K];
- T_{∞} : temperatura ambiente exterior [K];
- α : difusividade térmica do fluido [m^2/s];

- ν : viscosidade cinemática do fluido [m^2/s];
- A_s : área da superfície [m^2];
- C : constante que depende do Ra_L .

Relativamente à Equação (31):

- Se $10^4 \leq Ra_L \leq 10^9$, o regime é laminar com $C = 0,59$ e $n = \frac{1}{4}$;
- Se $10^9 \leq Ra_L \leq 10^{13}$, o regime é turbulento com $C = 0,10$ e $n = \frac{1}{3}$.

Para as paredes verticais e teto existentes no secador, o número de Nusselt é calculado a partir de [30]:

$$\overline{Nu}_L = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad (32)$$

As propriedades do fluido são avaliadas à temperatura média de película, dada por:

$$T_{\text{filme}} = \frac{T_s + T_{\infty}}{2} \quad (33)$$

Relativamente ao teto do secador, a força de impulsão é dirigida na direção perpendicular à superfície. As características do escoamento dependem do facto da superfície se encontrar a uma temperatura maior ou menor do que a temperatura ambiente e de qual das superfícies (superior ou inferior) se encontra aquecida ou arrefecida (face ao ambiente). A Figura 46 representa o caso em estudo, com a temperatura da superfície a ser superior à temperatura do ar ambiente [30].

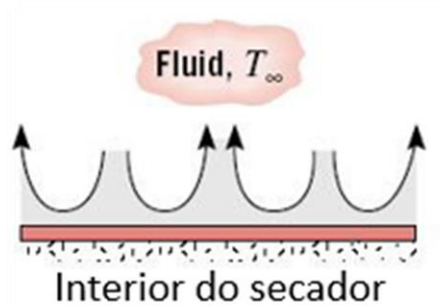


Figura 46 - Placa horizontal representativa do caso em estudo ($T_s > T_{\infty}$) [30].

Para a superfície superior de uma placa horizontal quente, existem duas equações que podem ser aplicadas [30]:

$$\overline{Nu}_L = 0,54 \cdot Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (34)$$

com $10^4 \leq Ra_L \leq 10^7$ e para todo o $Pr > 0,7$ e:

$$\overline{Nu}_L = 0,15 \cdot Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad (35)$$

com $10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}$ e para todo o Pr .

Para o caso da parede do teto, a dimensão característica a utilizar na determinação das grandezas adimensionais é [30]:

$$L = \frac{A_s}{P}$$

onde A_s é a área da superfície e P o seu perímetro.

Radiação

O calor transferido por radiação é calculado como:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot A_s \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (36)$$

onde:

- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [W/(m^2 \cdot K^4)]$, é a constante de Stefan-Boltzmann;
- $T_{surr} [K]$ representa a temperatura da vizinhança de cada superfície;
- ε , é a emissividade da superfície exterior.

5.3.3.2.2 Ar de Chacota

O ar de chacota é o ar que faz o pré-aquecimento no forno de chacota. O caudal energético do ar de chacota (\dot{E}_{chac}), é calculado a partir do caudal mássico do ar de chacota (\dot{m}_{chac}), do calor específico a pressão constante do ar ($C_{p_{chac}}$), da temperatura do ar (T_{chac}) e da temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{chac} = \dot{m}_{chac} \cdot C_{p_{chac}} \cdot (T_{chac} - T_r) \quad (37)$$

5.3.3.2.3 Ar de Exaustão

O ar sobranete não é nada mais do que o ar de exaustão, que é removido para a atmosfera. O caudal energético ar de exaustão (\dot{E}_{sob}), é obtido a partir do caudal mássico de ar (\dot{m}_{sob}), do calor específico a pressão constante do ar ($C_{p_{sob}}$), da temperatura do ar (T_{sob}) e da temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{sob} = \dot{m}_{sob} \cdot C_{p_{sob}} \cdot (T_{sob} - T_r) \quad (38)$$

5.3.3.2.4 Louça na saída

Na saída do secador, a louça ainda está húmida, o que significa que a água não evaporou toda no processo de secagem da louça. Assim, a louça é dividida em duas componentes: louça seca (denominada louça) e água.

O caudal energético referente à louça na saída é calculado a partir do caudal mássico de louça ($\dot{m}_{\text{louça}}$), do calor específico a pressão constante da louça ($C_{p_{\text{louça,out}}}$), da temperatura da louça ($T_{\text{louça,out}}$) e da temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{\text{louça,out}} = \dot{m}_{\text{louça}} \cdot C_{p_{\text{louça,out}}} \cdot (T_{\text{louça,out}} - T_r) \quad (39)$$

Já o caudal térmico referente à água presente na louça à saída do secador é calculado a partir da Equação (40), sendo necessário saber a humidade final (X_{out}), o caudal mássico de louça ($\dot{m}_{\text{louça}}$), o calor específico a pressão constante da água ($C_{p_{\text{água,out}}}$), a temperatura da água ($T_{\text{água,out}}$) e a temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{\text{água,out}} = X_{\text{out}} \cdot \dot{m}_{\text{louça}} \cdot C_{p_{\text{água,out}}} \cdot (T_{\text{água,out}} - T_r) \quad (40)$$

Contudo, ainda se deve considerar a água que foi evaporada e que não sai com a louça. Para o cálculo deste caudal energético de água evaporada é necessário conhecer a humidade final (X_{out}) e inicial (X_{in}), o caudal mássico de louça ($\dot{m}_{\text{louça}}$), o calor específico a pressão constante da água ($C_{p_{\text{água,out}}}$), o calor latente de vaporização da água (h_v), a temperatura da água ($T_{\text{água,out}}$) e a temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{\text{agevap,out}} = (X_{\text{in}} - X_{\text{out}}) \cdot \dot{m}_{\text{louça}} \cdot (h_v + C_{p_{\text{água,out}}} \cdot (T_{\text{água,out}} - T_r)) \quad (41)$$

5.3.3.2.5 Vagonas na saída

O caudal energético associado às vagonas na saída ($\dot{E}_{\text{vag,out}}$) é calculado a partir do caudal mássico de vagonas na saída (\dot{m}_{vag}), do calor específico a pressão constante ($C_{p_{\text{vag,out}}}$), da temperatura das vagonas ($T_{\text{vag,out}}$) e da temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{\text{vag,out}} = \dot{m}_{\text{vag}} \cdot C_{p_{\text{vag,out}}} \cdot (T_{\text{vag,out}} - T_r) \quad (42)$$

5.3.3.2.6 Mobília refratária na saída

Em relação ao caudal energético associado à mobília refratária na saída ($\dot{Q}_{\text{mob,out}}$), este é calculado a partir da Equação (43), sendo necessário conhecer o caudal mássico de mobília na saída (\dot{m}_{mob}), do calor específico a pressão constante da mobília

refratária ($C_{p_{mob,out}}$), da temperatura da mobília refratária ($T_{mob,out}$) e da temperatura de referência (T_r).

$$\dot{E}_{mob,out} = \dot{m}_{mob} \cdot C_{p_{mob,out}} \cdot (T_{mob,out} - T_r) \quad (43)$$

5.4 Casos de Estudo

Foram analisados três casos de estudo. O primeiro caso diz respeito ao secador a funcionar com o queimador de gás ligado, querendo isto dizer que existia consumo de gás natural para o seu funcionamento.

O segundo caso, após a colocação da nova conduta de ar quente oriunda do permutador de calor ar/ar, funcionava com o queimador ligado mais o ar quente da nova conduta. Esta nova conduta de ar quente faz o aproveitamento do ar, proveniente do permutador de calor ar/ar, que vai buscar ar quente ao forno de vidro e ao forno de decoração, insuflando-o em contracorrente no secador do forno de chacota.

O terceiro caso retrata o secador com o queimador desligado (não existindo consumo de gás natural) funcionando com o ar quente proveniente do forno de chacota e com o ar quente da nova conduta.

A metodologia adotada para todos os casos foi a mesma. Foi efetuada a medição das temperaturas e das velocidades de interesse. Após estas medições, foi efetuada a análise das vagonas de modo a determinar a sua massa média (esta massa varia de caso para caso), e o tipo de peças presentes. Este processo foi feito antes e após o secador para determinação da massa perdida ao longo do processo de secagem. Relativamente às constantes (poder calorífico inferior do gás natural, massas volúmicas e calores específicos) estão representadas no Anexo 1, para cada um dos casos.

5.4.1 Caso 1: Só Queimador

O 1.º caso de estudo corresponde ao secador com o queimador ligado, sendo a única fonte de calor para o secador, considerando que o ar de admissão (de combustão) já vem aquecido do forno de chacota. As temperaturas relevantes para o cálculo das correntes energéticas estão na Tabela 2, enquanto as velocidades e humidade das peças, na entrada e saída do secador, estão na Tabela 3.

Tabela 2 - Temperaturas para o caso 1.

Corrente	Temperatura (°C)
Gás natural	300,0
Ar de admissão	122,0
Ar de exaustão	65,0
Ar de chacota	46,0
Entrada do secador	23,0
Louça na saída	39,5
Vagonas na saída	29,6
Mobília na saída	36,8
Ambiente	26,5

A corrente representada por “entrada do secador” diz respeito à louça, mobília refratária e vagonas na entrada do secador.

Tabela 3 - Humidades e velocidades do ar para o caso 1.

Variável	Valor	Unidades
Humidade inicial	1,910 %	kg _{água} / kg _{louça}
Humidade final	0,465 %	
Velocidade do ar de admissão	1,54	m/s
Velocidade do ar de exaustão	11,16	
Velocidade do ar de chacota	7,52	

Com base na Equação (2) e nos caudais mássicos determinados é possível perceber se o ar parasita (ar não contabilizado) é elevado ou não. Fazendo a separação entre os caudais de entrada (44) e de saída (45), é determinado o caudal de ar não contabilizado (46) (\dot{m}_{outros}).

$$\sum_{\text{in}} \dot{m} = \dot{m}_{\text{gás}} + \dot{m}_{\text{ar,in}} + \dot{m}_{\text{água,in}} = 0,3436 \text{ [kg/s]} \quad (44)$$

$$\sum_{\text{out}} \dot{m} = \dot{m}_{\text{sob}} + \dot{m}_{\text{chac}} + \dot{m}_{\text{água,out}} = 2,3600 \text{ [kg/s]} \quad (45)$$

$$\sum_{\text{out}} \dot{m} - \sum_{\text{in}} \dot{m} = \dot{m}_{\text{outros}} = 2,0164 \text{ [kg/s]} \quad (46)$$

A discrepância do caudal mássico de ar não contabilizado é enorme, representando 6 vezes mais que os caudais mássicos medidos à entrada do secador. Este valor confirma que o processo de secagem era ineficiente uma vez que os ventiladores de circulação do ar aspiravam, além do ar quente de admissão, ar do ambiente industrial penalizando a eficácia do processo.

Na Tabela 4 estão apresentados os caudais mássicos de cada variável de estudo.

Tabela 4 - Caudais mássicos para o caso 1.

	Variável	Valor	Unidades
Entrada	$\dot{m}_{\text{gás}}$	0,0028	kg/s
	$\dot{m}_{\text{ar,in}}$	0,3368	
	$\dot{m}_{\text{água,in}}$	0,0040	
Saída	\dot{m}_{sob}	2,2603	
	\dot{m}_{chac}	0,0992	
	$\dot{m}_{\text{água,out}}$	0,0010	
Entrada = Saída	$\dot{m}_{\text{louça}}$	0,2080	
	\dot{m}_{vag}	0,2889	
	\dot{m}_{mob}	0,2033	
Não Contabilizado	\dot{m}_{outros}	2,0164	

Após a determinação dos caudais mássicos, é aplicado o princípio da conservação de energia com base na Equação (5), para determinação do caudal energético de cada corrente. Na Equação (47) estão representados todos os caudais energéticos de entrada e na Equação (48) os caudais energéticos de saída. O caudal energético não contabilizado (\dot{E}_{outros}) é dado pela Equação (49).

$$\begin{aligned}\dot{E}_{\text{total,in}} &= \dot{E}_{\text{gás}} + \dot{E}_{\text{ar,in}} + \dot{E}_{\text{água,in}} + \dot{E}_{\text{louça,in}} + \dot{E}_{\text{vag,in}} + \dot{E}_{\text{mob,in}} + \dot{E}_{\text{ar,outros}} \\ &= 236,81 \text{ [kJ/s]}\end{aligned}\quad (47)$$

$$\begin{aligned}\dot{E}_{\text{total,out}} &= \dot{E}_{\text{sob}} + \dot{E}_{\text{chac}} + \dot{E}_{\text{louça,out}} + \dot{E}_{\text{agevap,out}} + \dot{E}_{\text{água,out}} + \dot{E}_{\text{vag,out}} + \dot{E}_{\text{mob,out}} \\ &+ \dot{E}_{\text{perdas}} = 189,32 \text{ [kJ/s]}\end{aligned}\quad (48)$$

$$\dot{E}_{\text{total,in}} - \dot{E}_{\text{total,out}} = \dot{E}_{\text{outros}} = 47,49 \text{ [kJ/s]}\quad (49)$$

Na Tabela 5 estão apresentados os caudais energéticos de cada corrente em estudo.

Tabela 5 – Caudais energéticos das correntes para o caso 1.

	Variável	Valor	Unidades
Entrada	$\dot{E}_{gás}$	128,09	kJ/s
	$\dot{E}_{ar,in}$	41,48	
	$\dot{E}_{louça,in}$	4,78	
	$\dot{E}_{água,in}$	0,38	
	$\dot{E}_{vag,in}$	4,39	
	$\dot{E}_{mob,in}$	3,88	
	$\dot{E}_{ar,outros}$	53,81	
Saída	\dot{E}_{sob}	147,95	
	\dot{E}_{chac}	4,59	
	$\dot{E}_{louça,out}$	8,22	
	$\dot{E}_{água,out}$	0,16	
	$\dot{E}_{agevap,out}$	7,83	
	$\dot{E}_{vag,out}$	5,66	
	$\dot{E}_{mob,out}$	6,21	
	\dot{E}_{perdas}	8,70	
Não Contabilizado	\dot{E}_{outros}	47,49	

Pela análise da tabela anterior, constata-se que o maior caudal energético das correntes de entrada é o do gás natural, e o menor é o da água existente na louça. No caso das correntes de saída, o maior caudal energético é o do ar de exaustão enquanto o menor é o da água que não evaporou presente na louça. O caudal energético não contabilizado, isto é, respeitante às perdas energéticas não contabilizadas diz respeito a aproximadamente 20,1 % do caudal energético de entrada. O gás natural é responsável por fornecer 54,1 % da energia ao sistema.

O secador de chacota, em 2018, representou 1,8 % do consumo de gás natural e 3,4 % do consumo de energia elétrica. Em termos de consumo total, representa 2,3 % do consumo total da energia na *Costa Verde*. Perante estes valores, surgiu a necessidade de intervencionar o secador com o intuito de reduzir o consumo de gás natural. Foi então introduzida uma conduta de ar quente na extremidade final do secador para insuflar ar

quente (em sentido contracorrente), de modo a tornar o processo de secagem mais eficiente e de desligar o queimador presente, acabando com o consumo de gás natural.

5.4.2 Caso 2: Queimador + Conduta Nova de Ar Quente

O segundo caso de estudo mantém o queimador ligado acrescentando a nova conduta de ar quente. Esta conduta (Figura 47 direita) é proveniente de outra conduta que transporta o ar quente recuperado por um permutador de calor, que por sua vez, faz o reaproveitamento do ar quente proveniente do forno de vidro e do forno de decoração, permitindo um melhor aproveitamento desse ar.



Figura 47 – Antes (esquerda) e após (direita) a nova conduta de ar quente.

Na Figura 48 está representado um diagrama com as correntes de entrada e de saída para o 2.º caso. A única diferença para o 1.º caso está relacionada com a conduta de ar quente representada por “ar entrada quente”.

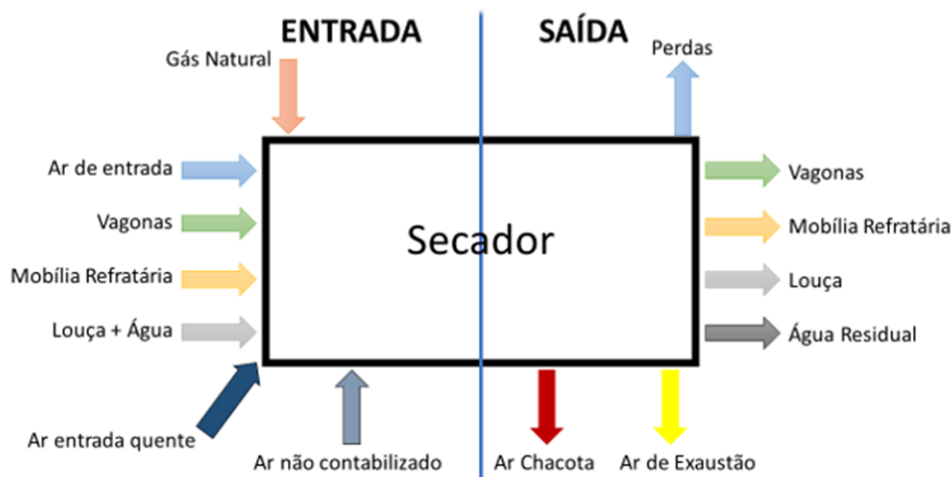


Figura 48 - Correntes de entrada e de saída do secador para o 2.º caso de estudo.

A descrição da metodologia é semelhante à do 1.º caso apresentado. As temperaturas relevantes para o cálculo das correntes energéticas estão na Tabela 6, enquanto as velocidades e humidade das peças na entrada e saída do secador estão na Tabela 7.

Tabela 6 - Temperaturas para o caso 2.

Corrente	Temperatura (°C)
Gás natural	300,0
Ar de admissão	130,0
Ar quente de entrada da nova conduta	174,0
Ar de exaustão	87,0
Ar de chacota	56,0
Entrada no secador	23,0
Louça na saída	42,7
Vagonas na saída	30,1
Mobília na saída	40,1
Ambiente	26,5

Tabela 7 - Humidades e velocidades do ar para o caso 2.

Variável	Valor	Unidades
Humidade inicial	1,802 %	kg _{água} / kg _{louça}
Humidade final	0,174 %	
Velocidade do ar de admissão	1,58	m/s
Velocidade do ar quente de entrada	10,95	
Velocidade do ar de exaustão	14,29	
Velocidade do ar de chacota	7,83	

Tal como no caso anterior, e fazendo a separação entre os caudais de entrada (50) e de saída (51), é determinado o caudal de ar não contabilizado (52) (\dot{m}_{outros}).

$$\sum_{\text{in}} \dot{m} = \dot{m}_{\text{gás}} + \dot{m}_{\text{ar,in}} + \dot{m}_{\text{água,in}} + \dot{m}_{\text{ar,hot}} = 2,3216 \text{ [kg/s]} \quad (50)$$

$$\sum_{\text{out}} \dot{m} = \dot{m}_{\text{sob}} + \dot{m}_{\text{chac}} + \dot{m}_{\text{água,out}} = 2,8171 \text{ [kg/s]} \quad (51)$$

$$\sum_{\text{out}} \dot{m} - \sum_{\text{in}} \dot{m} = \dot{m}_{\text{outros}} = 0,4955 \text{ [kg/s]} \quad (52)$$

Neste caso de estudo, o caudal mássico de ar não contabilizado representa 21,3 % do caudal mássico de entrada medido. Face ao analisado no 1.º caso de estudo, a diminuição de ar parasita foi de 1,5 kg/s, tornando o processo de secagem mais eficiente e com menor necessidade de os ventiladores de circulação aspirarem ar das naves industriais para efetuar a secagem das peças cerâmicas.

Na Tabela 8 são apresentados os caudais mássicos de cada variável em estudo.

Tabela 8 - Caudais mássicos para o caso 2.

	Variável	Valor	Unidades
Entrada	$\dot{m}_{\text{gás}}$	0,0027	kg/s
	$\dot{m}_{\text{ar,in}}$	0,3372	
	$\dot{m}_{\text{água,in}}$	0,0035	
	$\dot{m}_{\text{ar,hot}}$	1,9782	
Saída	\dot{m}_{sob}	2,7170	
	\dot{m}_{chac}	0,0998	
	$\dot{m}_{\text{água,out}}$	0,0003	
Entrada = Saída	$\dot{m}_{\text{louça}}$	0,1945	
	\dot{m}_{vag}	0,2889	
	\dot{m}_{mob}	0,2033	
Não Contabilizado	\dot{m}_{outros}	0,4955	

Na Equação (53) estão representados todos os caudais energéticos de entrada, e na Equação (54) os caudais energéticos de saída. O caudal energético não contabilizado (\dot{E}_{outros}) é dado pela Equação (55).

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{total,in}} = \dot{E}_{\text{gás}} + \dot{E}_{\text{ar,in}} + \dot{E}_{\text{ar,hot}} + \dot{E}_{\text{água,in}} + \dot{E}_{\text{louça,in}} + \dot{E}_{\text{vag,in}} + \dot{E}_{\text{mob,in}} \\ + \dot{E}_{\text{ar,outros}} = 543,00 \text{ [kJ/s]} \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\text{total,out}} = \dot{E}_{\text{sob}} + \dot{E}_{\text{chac}} + \dot{E}_{\text{louça,out}} + \dot{E}_{\text{água,out}} + \dot{E}_{\text{agevap,out}} + \dot{E}_{\text{vag,out}} + \dot{E}_{\text{mob,out}} \\ + \dot{E}_{\text{perdas}} = 284,30 \text{ [kJ/s]} \end{aligned} \quad (54)$$

$$\dot{E}_{\text{total,in}} - \dot{E}_{\text{total,out}} = \dot{E}_{\text{outros}} = 258,70 \text{ [kJ/s]} \quad (55)$$

Na Tabela 9 estão apresentados os caudais energéticos das correntes em estudo.

Tabela 9 – Caudais energéticos das correntes para o caso 2.

	Variável	Valor	Unidades
Entrada	$\dot{E}_{gás}$	122,01	kJ/s
	$\dot{E}_{ar,in}$	44,25	
	$\dot{E}_{ar,hot}$	350,44	
	$\dot{E}_{louça,in}$	4,47	
	$\dot{E}_{água,in}$	0,34	
	$\dot{E}_{vag,in}$	4,39	
	$\dot{E}_{mob,in}$	3,88	
	$\dot{E}_{ar,outros}$	13,22	
Saída	\dot{E}_{sob}	238,27	
	\dot{E}_{chac}	5,63	
	$\dot{E}_{louça,out}$	8,31	
	$\dot{E}_{água,out}$	0,06	
	$\dot{E}_{agevap,out}$	8,34	
	$\dot{E}_{vag,out}$	5,75	
	$\dot{E}_{mob,out}$	6,77	
	\dot{E}_{perdas}	11,17	
Não Contabilizado	\dot{E}_{outros}	258,70	

Analisando a Tabela 9, e em relação às correntes de entrada, o maior caudal energético é do ar quente proveniente da nova conduta e o menor é o da água existente na louça. No caso das correntes de saída, o maior caudal energético é o do ar de exaustão enquanto o menor é o da água que não evaporou presente na louça. O caudal energético não contabilizado diz respeito a aproximadamente 47,6 % do valor total de entrada.

O gás natural é responsável por fornecer 22,5 % da energia ao sistema, com um débito de 11,44 Nm³/h enquanto o ar quente da conduta fornece 64,5 % do calor ao sistema. Mesmo que não muito significativa, é notória a diminuição do consumo do gás natural comparando com o 1º caso de estudo justificada pela introdução da nova conduta, permitindo uma poupança energética que se traduziria numa redução de 4,75 % da fatura financeira anual.

5.4.3 Caso 3: Só Conduta Nova de Ar Quente

O terceiro caso de estudo corresponde à utilização do secador com o queimador desligado. Na Figura 49 está representado o diagrama com as correntes de entrada e de saída para o 3.º caso. A diferença para o 2.º caso está relacionada com a ausência do gás natural como corrente de entrada.

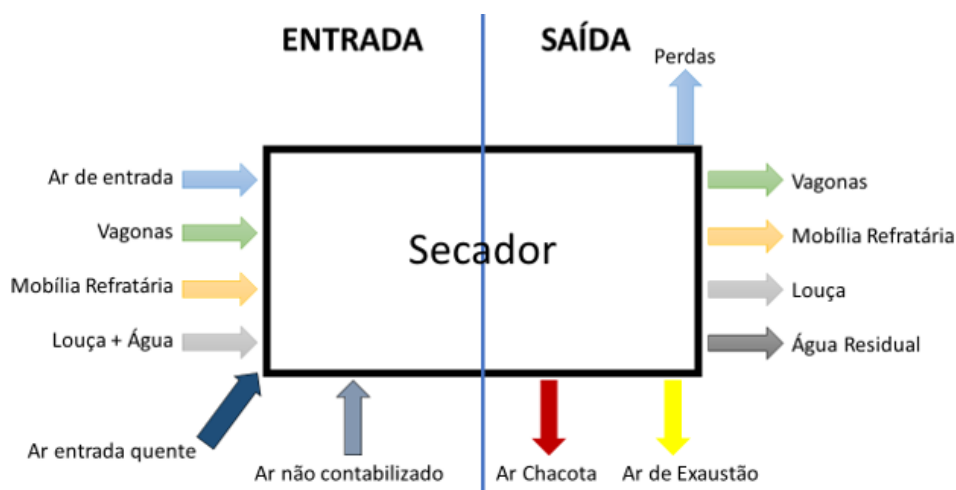


Figura 49 - Correntes de entrada e de saída do secador para o 3.º caso de estudo.

As temperaturas relevantes para o cálculo das correntes energéticas estão na Tabela 10, enquanto as velocidades e humidade das peças, na entrada e saída do secador estão na Tabela 11.

Tabela 10 - Temperaturas para o caso 3.

Corrente	Temperatura (°C)
Ar de admissão	131,0
Ar quente de entrada da nova conduta	178,0
Ar de exaustão	68,0
Ar de chacota	64,0
Entrada no secador	23,0
Louça na saída	43,4
Vagonas na saída	30,4
Mobília na saída	41,1
Ambiente	26,5

Tabela 11 - Humidades e velocidades do ar para o caso 3.

Variável	Valor	Unidades
Humidade inicial	1,848 %	kg _{água} / kg _{louça}
Humidade final	0,139 %	
Velocidade do ar de admissão	1,58	m/s
Velocidade do ar quente de entrada	12,63	
Velocidade do ar de exaustão	14,08	
Velocidade do ar de chacota	6,74	

Fazendo a separação entre os caudais de entrada (56) e de saída (57), é determinado o caudal de ar não contabilizado (58) (\dot{m}_{outros}).

$$\sum_{\text{in}} \dot{m} = \dot{m}_{\text{ar,in}} + \dot{m}_{\text{água,in}} + \dot{m}_{\text{ar,hot}} = 2,6012 \text{ [kg/s]} \quad (56)$$

$$\sum_{\text{out}} \dot{m} = \dot{m}_{\text{sob}} + \dot{m}_{\text{chac}} + \dot{m}_{\text{água,out}} = 2,9090 \text{ [kg/s]} \quad (57)$$

$$\sum_{\text{out}} \dot{m} - \sum_{\text{in}} \dot{m} = \dot{m}_{\text{outros}} = 0,3078 \text{ [kg/s]} \quad (58)$$

Na Tabela 12 estão apresentados os caudais mássicos de cada corrente em estudo.

Tabela 12 - Caudais mássicos para o caso 3.

	Variável	Valor	Unidades
Entrada	$\dot{m}_{ar,in}$	0,3372	kg/s
	$\dot{m}_{água,in}$	0,0030	
	$\dot{m}_{ar,hot}$	2,2609	
Saída	\dot{m}_{sob}	2,8249	
	\dot{m}_{chac}	0,0838	
	$\dot{m}_{água,out}$	0,0002	
Entrada = Saída	$\dot{m}_{louça}$	0,1649	
	\dot{m}_{vag}	0,2889	
	\dot{m}_{mob}	0,2033	
Não Contabilizado	\dot{m}_{outros}	0,3078	

Na Equação (59) estão representadas todos os caudais energéticos de entrada e na Equação (60) os caudais energéticos de saída. O caudal energético não contabilizado (\dot{E}_{outros}) é dado pela Equação (61).

$$\begin{aligned}\dot{E}_{total,in} &= \dot{E}_{ar,in} + \dot{E}_{ar,hot} + \dot{E}_{água,in} + \dot{E}_{louça,in} + \dot{E}_{vag,in} + \dot{E}_{mob,in} + \dot{E}_{ar,outros} \\ &= 474,88 \text{ [kJ/s]}\end{aligned}\quad (59)$$

$$\begin{aligned}\dot{E}_{total,out} &= \dot{E}_{sob} + \dot{E}_{chac} + \dot{E}_{louça,out} + \dot{E}_{água,out} + \dot{E}_{vag,out} + \dot{E}_{mob,out} + \dot{E}_{perdas} \\ &= 237,25 \text{ [kJ/s]}\end{aligned}\quad (60)$$

$$\dot{E}_{total,in} - \dot{E}_{total,out} = \dot{E}_{outros} = 237,63 \text{ [kJ/s]}\quad (61)$$

Na Tabela 13 estão apresentados os caudais energéticos de cada corrente em estudo.

Tabela 13 – Caudais energéticos das correntes para o caso 3.

	Variável	Valor	Unidades
Entrada	$\dot{E}_{ar,in}$	44,59	kJ/s
	$\dot{E}_{ar,hot}$	409,73	
	$\dot{E}_{louça,in}$	3,79	
	$\dot{E}_{água,in}$	0,29	
	$\dot{E}_{vag,in}$	4,39	
	$\dot{E}_{mob,in}$	3,88	
	$\dot{E}_{ar,outros}$	8,21	
Saída	\dot{E}_{sob}	193,63	
	\dot{E}_{chac}	5,40	
	$\dot{E}_{louça,out}$	7,16	
	$\dot{E}_{água,out}$	0,04	
	$\dot{E}_{agevap,out}$	7,39	
	$\dot{E}_{vag,out}$	5,81	
	$\dot{E}_{mob,out}$	6,94	
	\dot{E}_{perdas}	10,88	
Não Contabilizado	\dot{E}_{outros}	237,63	

Pela análise da Tabela 13, quanto às correntes de entrada, o maior caudal energético é do ar quente proveniente da nova conduta e o menor é o da água existente na louça. No caso das correntes de saída, o maior caudal energético é o do ar de exaustão enquanto o menor é o da água que não evaporou presente na louça. O caudal energético não contabilizado diz respeito a aproximadamente 49,7 % do valor total de entrada e o ar quente fornece 86,3 % da energia ao sistema.

5.4.4 Análise de Resultados

Compilando os dados obtidos anteriormente, nas Tabela 14 e Tabela 15, é possível verificar os ganhos energéticos e financeiros obtidos com a colocação da nova conduta de ar quente.

Os dados do 1.º caso de estudo, encontram-se na Tabela 14:

Tabela 14 – 1.º Caso de estudo.

Consumo gás (Nm ³ /h)	12,00
Previsão para o consumo gás anual em 2019 (Nm ³)	95.040
Consumo anual (tep)	86,0
Emissões Anuais (tCO ₂ e)	230,9
$\dot{E}_{total,in}$ (kJ/s)	236,81

Já os dados do 2.º caso de estudo, encontram-se na Tabela 15:

Tabela 15 – 2.º Caso de estudo.

Consumo gás (Nm ³ /h)	11,44
Previsão para o consumo gás anual em 2019 (Nm ³)	90.605
Consumo anual (tep)	82,0
Emissões Anuais (tCO ₂ e)	220,1
$\dot{E}_{total,in}$ (kJ/s)	543,00

Comparando os casos de estudo em que o queimador se encontrava ligado, fica perceptível que existiria uma diminuição do consumo de gás natural de 4,0 tep (0,56 Nm³/h). Esta diminuição é justificada devido à introdução da nova conduta de ar quente, que adicionou mais de 300 kJ/s de energia ao sistema, permitindo um menor consumo de gás natural para aquecimento do ar de entrada. Se o queimador continuasse ligado, as emissões anuais seriam reduzidas em 10,8 tCO₂e.

Como o objetivo da intervenção era o fim de uso do gás natural, ajustaram-se as válvulas reguladoras de admissão de ar em cada ventilador com o propósito de se obter uma curva de secagem em crescendo, com o seu máximo próximo do meio do secador. A curva de secagem de cada um dos casos está representada na Figura 50.

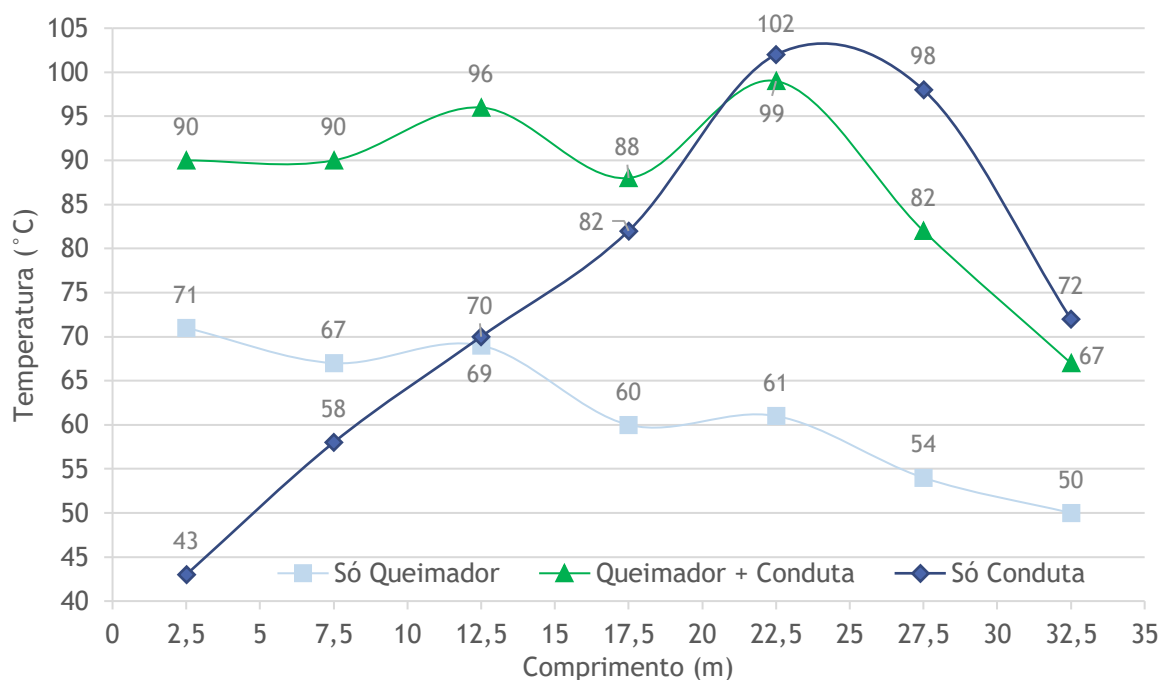


Figura 50 - Curvas de temperaturas dos gases ao longo do secador do forno de chacota.

Pela análise da Figura 50 observa-se a diferença das curvas de secagem de cada um dos casos de estudo. A curva de secagem relativa ao 1.º caso de estudo (só queimador) não era adequada pois era em decrescendo, contrariando assim o pretendido, e as temperaturas atingidas não permitiam um processo de secagem tão efetivo. Após a introdução da conduta, e mantendo o queimador ligado, a curva de secagem do 2.º caso (queimador + conduta) já apresentava um perfil correto apesar de a temperatura no início do secador ser relativamente alta, podendo existir um choque térmico que danificaria as peças. A curva de secagem respeitante ao 3.º caso (só conduta) é a que apresenta o comportamento esperado, aumentando até pouco depois do meio do secador e começando a decrescer a partir desse ponto. Este comportamento permite um aquecimento contínuo e gradual das peças, e um processo de secagem mais eficiente, com um aumento da temperatura e redução da humidade final das peças à saída do secador face aos outros casos de estudo (Tabela 16). O fim do uso de gás natural, aumentando a eficiência energética do secador, também foi conseguido com este 3.º caso.

Tabela 16 - Temperaturas e humidades após o secador, e caudal energético de entrada do sistema.

	Temperatura da louça à saída (°C)	Humidade final (%)	Caudal energético de entrada (kJ/s)
1.º caso - Só queimador	39,5	0,4650	236,81
2.º caso - Queimador + conduta Nova	42,7	0,1735	543,00
3.º caso - Só conduta nova	43,4	0,1393	474,88

Pela análise da Tabela 16 é notório o aumento da temperatura e a redução da humidade da louça na saída do secador após a introdução da conduta de ar quente.

Comparando o consumo anual de gás natural de 2018, com o consumo de gás natural de 2019 (Tabela 17), até ao início do mês de abril, data à qual foi desligado o gás natural no secador do forno de chacota, existe uma diminuição de 23,5 tep em relação ao consumo de 2018. Uma explicação para a diferença do consumo de 2018 para 2019 ser tão pequena, é devida a uma alteração na conduta de admissão do ar para o secador, proveniente do forno de chacota, e por um problema no termopar de leitura da temperatura do queimador, uma vez que a temperatura lida pelo termopar é a base para regulação da quantidade de gás consumido, originando um consumo excessivo num curto período de tempo (3 meses). Se a nova conduta não fosse colocada, o aumento do consumo de gás natural, em relação a 2018, seria de 60 %.

Tabela 17 – Comparação do consumo de gás natural entre 2018, 2019 e 2020.

Comparação dos consumos de 2018 com:	2019¹	2020²
Redução de consumo (tep)	23,5	50,8
Redução de consumo (%)	46,6	100
Redução de emissões (tCO ₂ e)	62,9	136,4

1 – Consumo de gás até início de abril de 2019.

2 – Previsão.

Face a 2018, é esperada uma redução do consumo de gás natural de 46,6 % no secador do forno de chacota. O payback estimado da intervenção, considerando o consumo de gás natural de 2019, é de apenas 10 meses.

6. Despoeiramento

Os processos industriais geram uma série de partículas que, não sendo tratadas, iriam poluir o ambiente de trabalho e a atmosfera. Os processos de despoeiramento têm por finalidade tratar o ar, antes que as partículas suspensas libertadas pelos equipamentos se dispersem no ar do ambiente de trabalho, ou seja, antes que atinjam a zona de respiração do trabalhador.

6.1 Sistemas de Ventilação

Com a crescente preocupação e cuidados com a saúde dos colaboradores, muito relacionada com as condições de trabalho, torna-se vital o desenvolvimento e constante melhoria dos sistemas de ventilação industriais. Contudo, a eficiência energética é um fator com peso fundamental na eventual melhoria destes sistemas, sendo importante analisar a sua viabilidade.

Os sistemas de ventilação apresentam diversas funções consoante a instalação, tais como [31] [32]:

- Promover a circulação de ar para manter o conforto humano;
- Remover o ar contaminado (gases, vapores ou poeiras);
- Promover a filtragem do ar.

Já as vantagens associadas à instalação de um sistema de ventilação são [31]:

- Proteção da saúde dos colaboradores;
- Melhoria das condições laborais e de higiene, através da melhoria da qualidade do ar interior com a remoção e redução dos contaminantes;
- Concentração das partículas poluentes recolhidas num único local.

Os sistemas de ventilação dividem-se em Ventilação Natural (VN), Ventilação Geral para Conforto Térmico (VGCT), Ventilação Geral Diluidora (VGD) e Ventilação Local Exaustora (VLE). A VLE é o tipo de ventilação (Figura 51) adotado na *Costa Verde*.

6.1.1 Ventilação Local Exaustora

Apresenta como objetivo principal a captação dos contaminantes (pó cerâmico, no caso em estudo) de uma fonte, antes que os mesmos se dispersem no ar do ambiente de trabalho, ou seja, antes que atinjam a zona de respiração do trabalhador (Figura 51) [31].

Um ambiente bem ventilado e livre de poluentes, ajuda a contribuir para a saúde e segurança dos colaboradores, sendo deste modo a VLE um método muito eficaz para controlar a qualidade do ar de um ambiente. A VLE consiste em remover o ar contaminado do local para a atmosfera, utilizando um sistema exaustor que irá tratar os contaminantes, filtrando-os, e efetuar a sua separação do ar para que este não provoque danos ambientais.

Para que os contaminantes emitidos possam ser tratados num equipamento de controlo de poluentes (filtros, por exemplo), estes têm de ser captados e conduzidos para esses equipamentos, sendo essa condução realizada por este tipo de sistema de ventilação [31] [33].

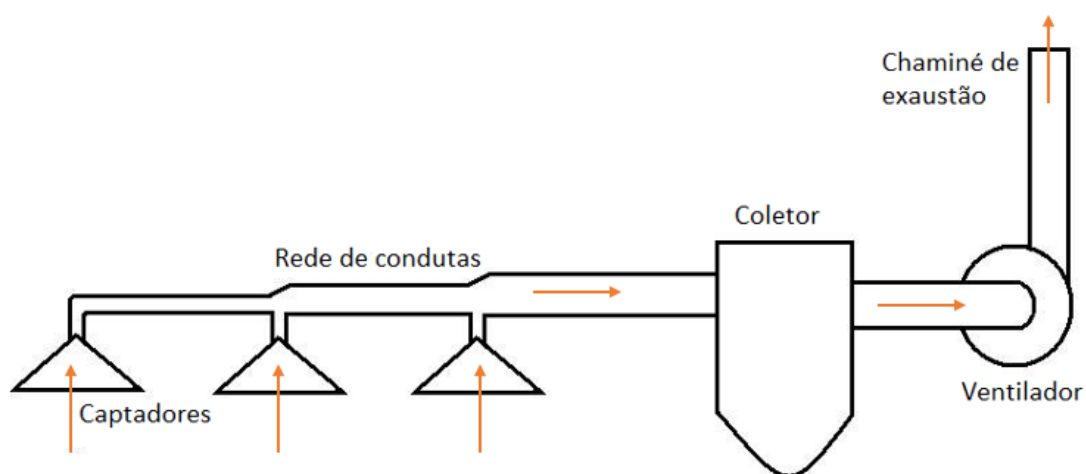


Figura 51 - Esquema de instalação de um sistema de ventilação local, adaptado de [31].

A movimentação do ar entre dois pontos P_1 e P_2 acontece devido à diferença de pressão entre os dois pontos. Esta diferença de pressão, forçada por um ou mais ventiladores, induz o escoamento de ar entre as zonas de alta e baixa pressão (Figura 52).

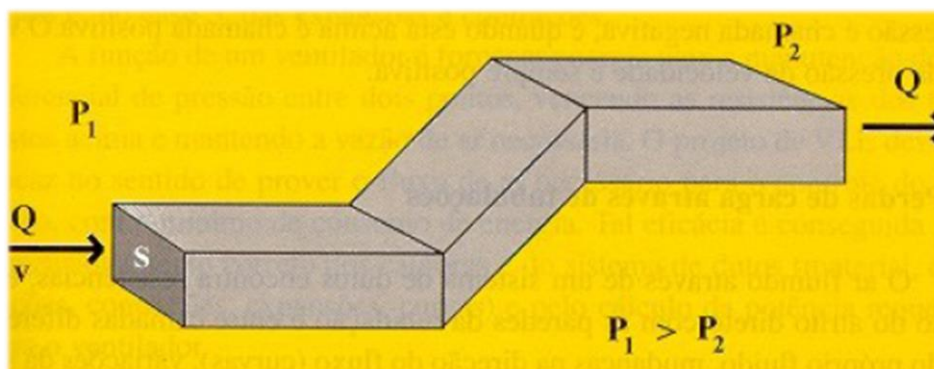


Figura 52 - Fluxo de ar entre dois pontos [33].

Os principais componentes de um sistema de VLE (Figura 51) são [33]:

- Captadores/Bocas de aspiração: são instalados o mais próximo possível da fonte de emissão dos poluentes, realizando a captura do ar contaminado;
- Sistema de condutas/tubagens: realizam o transporte do ar contaminado da fonte até ao seu tratamento;
- Coletor/Filtro: retém os poluentes, impedindo o seu lançamento na atmosfera (coletores de partículas, filtros, lavadores de gases e vapores) fazendo a separação entre o ar e as partículas aspiradas;
- Ventilador/Exaustor: força o escoamento dos gases, criando um diferencial de pressão (uma depressão neste caso).

6.2 Despoeiramento na *Costa Verde*

A criação de políticas de desenvolvimento sustentável e a minimização dos impactos ambientais, através do controlo das emissões de poluentes e a diminuição da produção de resíduos, são medidas que as empresas, em geral, precisam de adotar, e mais especialmente as que operam com elevadas emissões de partículas para a atmosfera. É imprescindível o uso de um sistema de limpeza de gases/poeiras eficiente, adequado ao ciclo operacional das empresas, já que estas seriam grandes poluidoras do meio ambiente se tais sistemas não fossem adotados. Simultaneamente, o ambiente de trabalho seria insuportável. Assim, para um correto processo de filtragem e para uma maior performance do sistema, é necessário o correto dimensionamento do sistema tendo em conta as características do processo e do ambiente da instalação, bem como o uso de equipamentos eficientes e tecnologicamente avançados. Com estas medidas, o sistema irá operar com elevada disponibilidade, apresentando uma longa vida útil e um baixo custo de manutenção [34].

Existem diversos equipamentos capazes de efetuar a absorção das partículas existentes no ar. O equipamento existente na *Costa Verde* é o filtro de mangas, muito semelhante ao representado na Figura 53, que apresenta elevada eficiência, devido à capacidade de filtração das mangas.

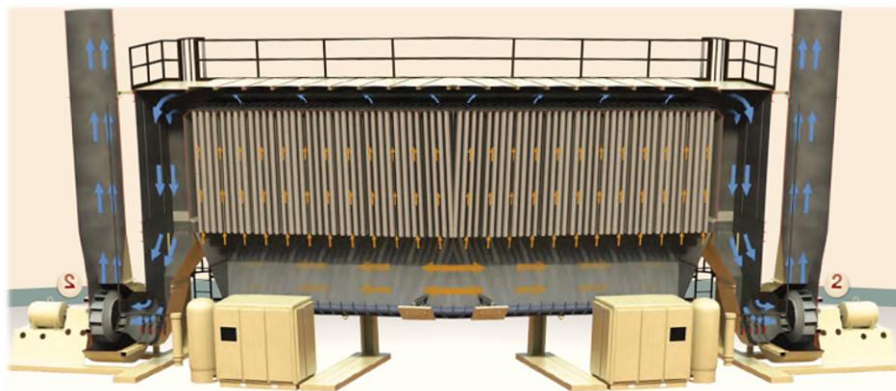


Figura 53 - Filtro de mangas, adaptado de [32].

O ar contaminado entra na parte inferior do corpo central da torre de despoeiramento e, no sentido ascendente, passa pelas mangas filtrantes onde os contaminantes ficam retidos já que o espaço entre as fibras do filtro é inferior ao tamanho dos contaminantes. O ar, já parcialmente livre de contaminantes, passa pelo ventilador que o exaure para o meio ambiente. As mangas são limpas com um jato de ar comprimido a intervalos de tempo definidos e as partículas assim recolhidas devidamente encaminhadas (no âmbito da economia circular, as partículas recolhidas são enviadas para as lamas da ETARI que, posteriormente, são enviadas para uma empresa que as reutilizará como matéria-prima).



Figura 54 – Torre de despoeiramento da Costa Verde.

A torre de despoeiramento, representada na Figura 54, tem uma área filtrante de 447 m². É dividida em:

- Corpo superior (1): Túnel diretamente ligado ao ventilador, onde é criada toda a depressão a impor nos filtros;
- Corpo central (2): Local onde se fixam os elementos principais da filtragem, mangas filtrantes e aranhas. A função deste conjunto é impedir a passagem de partículas e poeiras diminutas para o exterior;
- Conjunto filtrante: Conjunto formado por mangas filtrantes, fechadas na parte inferior, abertas na parte superior, e fixadas pelo sistema de *snap-ring* (semelhante ao representado na Figura 53) No interior de cada uma é aplicada uma aranha metálica para manutenção do filtro, e na parte superior de cada aranha está fixado o Venturi para uma melhor aceleração da entrada do ar comprimido de limpeza das mangas;
- Sistema de limpeza: Elemento formado por um coletor de descarga de ar comprimido contendo uma aranha com bicos injetores, sendo efetuada a entrada de ar nos Venturis através de eletroválvulas comandadas para proceder à limpeza das mangas;
- Sistema Elétrico: É formado por um programador cíclico comandando a abertura das eletroválvulas;
- Tremonha (3): Situada na parte inferior do corpo central, para receber todos os resíduos e partículas retidos;
- Sem-fim de extração (4): Instalado na tremonha, com o seu movimento rotativo a ser forçado por um motor elétrico. A sua função é evacuar todos os resíduos e partículas que se encontram depositados na tremonha.

O sistema de despoeiramento da *Costa Verde* possui dois ventiladores RTB (Radial Tip Blade) 1000 TC, do tipo centrífugo, modelo TB 1000 TC, constituídos, cada um, por um motor elétrico trifásico com uma potência nominal de 45 kW, de 4 polos. A transmissão do movimento motor-ventilador é feita por correia do tipo trapezoidal (ou *v-belt*).

O motor elétrico associado a cada ventilador é um motor MEZ Frenstat, 1475 rpm, de classe energética IE1. O seu rendimento teórico encontra-se na Tabela 18.

Tabela 18 - Dados técnicos sobre os motores associados aos ventiladores.

% de carga	50	75	100
Rendimento (%)	91,7	92,1	91,7

Os dados técnicos respeitantes aos ventiladores estão resumidos na Tabela 19, tendo sido calculados para 70 % do caudal total, segundo a documentação técnica do equipamento.

Tabela 19 - Dados técnicos dos dois ventiladores do sistema de despoeiramento.

Caudal (m ³ /h)	59.000
Pressão (mbar)	40
Potência calculada (kW)	85,6
Rendimento (%)	75
Velocidade do ar (m/s)	30
Potência instalada (kW)	2 x 45

Do ponto de vista energético, os ventiladores e os motores elétricos são dos elementos mais importantes do sistema de despoeiramento. Assim, será feita uma análise cuidada de ambos, e proposta a sua substituição por elementos mais eficientes.

6.3 Ventiladores

Um ventilador é uma máquina que, por meio da rotação de um rotor provido de pás adequadamente distribuídas, e acionado por um motor, permite transformar a energia mecânica do rotor em formas de energia (potencial) de pressão e energia cinética. Graças à energia adquirida, o ar é capaz de vencer as resistências oferecidas pelo sistema de distribuição ao seu escoamento. O seu acionamento pode ser feito por acoplamento direto do motor ao rotor, ou indireto por meio de polias e correias de transmissão [35].

Os ventiladores são classificados de acordo com a forma como o fluxo de ar atravessa o rotor (impulsor) em (Figura 55): radiais/centrífugos, axiais ou mistos. Num ventilador centrífugo o escoamento de saída dá-se perpendicularmente ao eixo do rotor, enquanto num ventilador axial a direção do escoamento coincide com a direção do eixo do rotor. Os ventiladores mistos são uma situação intermédio dos dois anteriores [36].

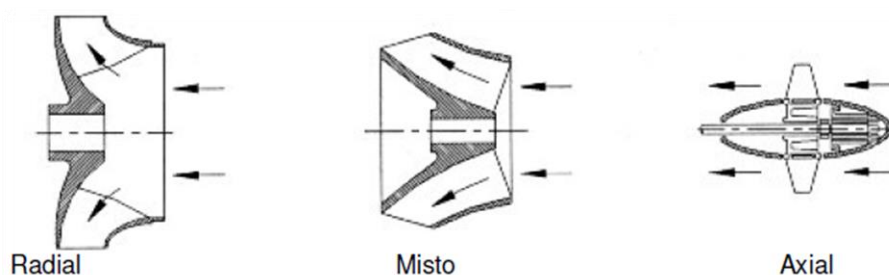


Figura 55 – Diferentes tipos de ventiladores [35].

Segundo o nível de pressão, os ventiladores são divididos em:

Tabela 20 - Nível de pressão dos ventiladores [36].

Nível de pressão	Pressão (kPa)
Baixa pressão	Até 1,97
Média pressão	1,97 a 7,85
Alta pressão	7,85 a 24,52
Muito alta pressão (turbocompressores)	Acima de 24,52

6.3.1 Ventiladores Centrífugos

Um ventilador centrífugo é caracterizado pela forma como o ar o atravessa, e também pela capacidade de vencer grandes resistências ao fluxo de ar. Consiste num rotor com pás, também chamado impulsor, e uma caixa coletora. O rotor tem como função forçar o fluxo de ar enquanto a caixa coletora (voluta) tem como finalidade captar o ar que entra e que sai do rotor [37].

O ar entra no centro do rotor e, à medida que se move do centro do impulsor para as extremidades das pás (radialmente), é acelerado (adquire energia cinética). Esta energia cinética é convertida num aumento de pressão estática à medida que o ar diminui de velocidade antes de ser impulsado (tangencialmente) para fora da caixa coletora. Estes ventiladores (Figura 56) operam com pequenos caudais, mas com a possibilidade de vencerem grandes resistências ao escoamento [37] [38].

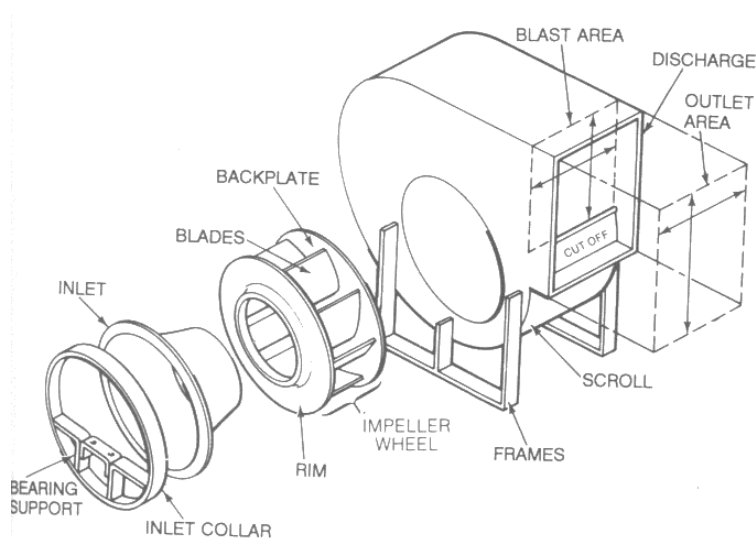
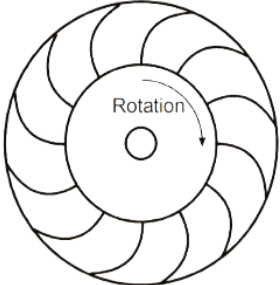
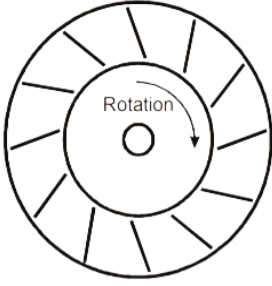
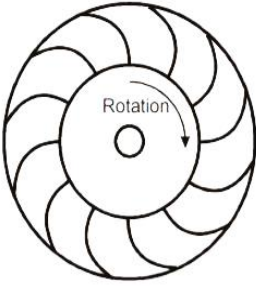
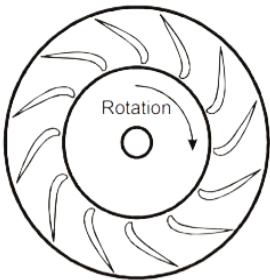
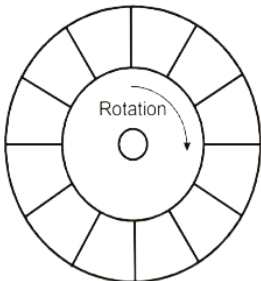
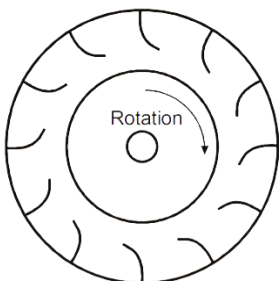


Figura 56 - Esquema de um ventilador centrífugo [38].

Podem ser classificados em relação à posição das pás do impulsor como: radiais (radial tip e radial blade), de pás curvadas para a frente, de pás curvadas ou inclinadas retas para trás, e airfoil. Cada uma das tipologias referidas anteriormente apresenta vantagens e desvantagens na sua utilização, resumidas na Tabela 21.

Tabela 21 - Tipos de ventiladores centrífugos [36] [37].

Tipo de Pás	Características
 <p>Curvadas para a frente</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Curva das pás na direção da rotação; - Movimentação de grande volume de ar a baixa pressão; - Utilizados com gases isentos de partículas sólidas; - Instabilidade com baixos caudais de ar; - Operam silenciosamente e apresentam baixa eficiência;
 <p>Inclinadas retas para trás</p>	<ul style="list-style-type: none"> - As pás são inclinadas na direção oposta à rotação; - A performance diminuiu com elevados caudais de ar; - Mais robusto comparando com outros tipos de pás; - O baixo ângulo de contacto com o ar facilita a acumulação de depósitos nas pás; - Promove baixa velocidade de ar através das lâminas;
 <p>Curvadas para trás</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Curva das pás na direção oposta da rotação; - Não são indicados para movimentar ar com partículas sólidas; - O baixo ângulo de contacto com o ar facilita a acumulação de depósitos nas pás; - Movimentação de grande volume de ar a média pressão, e baixo nível de ruído;

 <p>Airfoil</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A secção transversal permite que o ar circule através das pás com menos turbulência comparando com as pás curvadas para trás; - O baixo ângulo de impacto com a corrente de ar promove a acumulação de depósitos nas pás, bem como a sua erosão; - Apresentam um maior custo inicial e são adequadas para ambientes limpos; - Movimentação de grande volume de ar a média/alta pressão; - Possuem as pás em perfil aerodinâmico de asa, sendo caracterizados por elevada eficiência;
 <p>Radial Blade (Pás Radiais)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Adequados para baixos a médios fluxos de ar a alta pressão; - Geralmente apresentam o custo mais baixo; - Operam a altas temperaturas; - Capacidade de trabalhar com ar com partículas sólidas; - Apresentam um nível de ruído elevado;
 <p>Radial Tip</p>	<ul style="list-style-type: none"> - São mais eficientes que os ventiladores com pás curvadas para a frente e de pás radiais, devido à baixa turbulência gerada pelo reduzido ângulo de ataque entre as pás e o ar que entra; - As pás devem ser curvadas para a frente, na zona de entrada, para encontrar o ar no ângulo de entrada correto para uma maior eficiência, e radial na extremidade para proporcionar uma característica de autolimpeza; - São aconselhados para o uso com correntes de ar que possuem partículas pequenas ou com elevado teor de humidade; - Apresentam um nível de ruído elevado;

Os diferentes tipos de ventiladores centrífugos apresentam eficiências máximas (ou de pico) distintas. Na Tabela 22 encontram-se as eficiências médias:

Tabela 22 – Eficiência máxima dos diferentes tipos de ventiladores centrífugos, adaptado de [36] [37].

Tipo de ventilador	Eficiência máxima (%)
Airfoil	85-90
Pás curvadas para trás	80-85
Inclinadas retas para trás	
Radial tip	72-79
Radial blade	69-75
Pás curvadas para a frente	60-65

6.4 Motores Elétricos

Um motor de indução é constituído, essencialmente, por um estator e por um rotor. O estator é o componente estático do motor, enquanto o rotor é a sua parte móvel. O motor converte energia elétrica em energia mecânica, tendo associado a este processo perdas, as quais estão associadas ao rendimento (ou eficiência) do motor, definido pela razão entre a potência de saída (W) e a potência elétrica à entrada (W) [39] [40] [41]:

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (62)$$

Em Portugal, a produção de energia mecânica, através da utilização de motores elétricos, absorve cerca de 60 % da energia elétrica consumida no setor industrial. Já na UE, os motores elétricos são responsáveis pelo uso de, sensivelmente, 65 % da energia elétrica consumida no setor industrial. Mundialmente, os motores elétricos consomem cerca de 70 % da energia elétrica do setor industrial, ou 40 % de toda a energia elétrica produzida. Os valores apresentados são elevados, sendo necessário a diminuição destas percentagens [39].

Esta necessidade de reduzir o consumo de energia e emissão de gases do efeito estufa, levou a UE, através do organismo EU MEPS (*European Minimum Energy Performance Standard*), a definir uma nova legislação que estabelece níveis mínimos de rendimento para motores elétricos de baixa tensão, dentro do mercado Europeu. Posteriormente, a IEC (*International Electrotechnical Commission*) desenvolveu uma norma internacional comum, com o objetivo de substituir todas as normas nacionais existentes [40].

A norma IEC 60034-30-1:2014 (definição das classes de eficiência) padroniza a definição e formato de publicação dos dados de eficiência entre os fabricantes de motores. Os motores abrangidos pela norma são [40]:

- Motores elétricos trifásicos de indução, de uma velocidade;
- 50 ou 60 Hz;
- Gaiola de esquilo;
- 2, 4 ou 6 polos;
- Potência de 0,75 a 375 kW;
- Funcionamento contínuo (S1);
- Tensão nominal até 1000 V.

De acordo com a norma IEC 60034-30-1:2014, os motores passam a ser classificados por [40]:

- IE1: Rendimento Standard;
- IE2: Alto Rendimento;
- IE3: Rendimento Premium;
- IE4: Rendimento Super Premium.

Desde 1 de janeiro de 2017 todos os motores elétricos com potência nominal entre 0,75 e 375 kW devem satisfazer o nível de eficiência IE3, ou o nível IE2 se equipados com um variador eletrónico de velocidade [40].

Substituir um motor de baixo rendimento por um motor de alta eficiência representará sempre uma poupança se for avaliado o (longo) período de vida útil do motor [40].

A Figura 57 mostra a relação entre cada classe energética com a potência do motor elétrico.

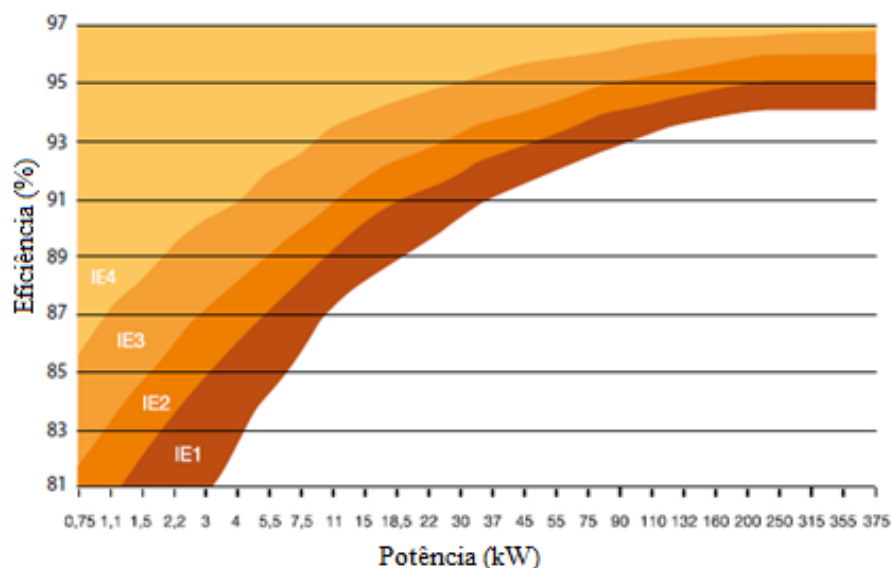


Figura 57 - Classes de eficiência de motores elétricos [41].

Na Figura 58 é perceptível a variação da eficiência com a percentagem de carga (fator de carga), que é a relação entre a potência do motor em operação e a potência nominal, isto porque há períodos em que o motor não necessita de operar na carga máxima. É um índice de operação dos motores, sendo que em 75 % dos motores o fator de carga é inferior a 60 % e, como observável na Figura 58, o rendimento de um motor baixa radicalmente para fatores de carga abaixo dos 50 %. Assim, é fundamental a escolha de um motor com a potência adequada à operação, para que este funcione próximo da sua carga nominal.

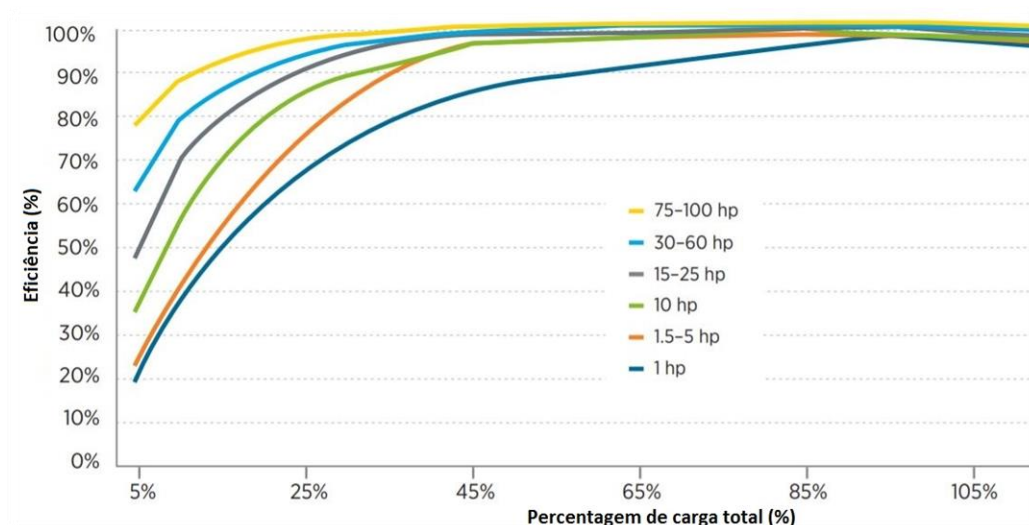


Figura 58 - Relação entre fator de carga e eficiência de motores elétricos [42].

O rendimento (Figura 59) máximo de um motor elétrico é obtido quando este é usado entre 75 a 85 % da sua carga nominal.

Para ser obtido o maior proveito energético do motor elétrico é adequado [39]:

- Dimensionar corretamente os equipamentos, fazendo os motores funcionar com cargas na ordem dos 75 a 85 %;
- Adaptar a velocidade de rotação do motor às necessidades do processo, utilizando um variador de velocidade sempre que necessário;
- Uma boa manutenção dos motores.

Potência (kW)	IE2				IE3				IE4			
	2 Pólos	4 Pólos	6 Pólos	8 Pólos	2 Pólos	4 Pólos	6 Pólos	8 Pólos	2 Pólos	4 Pólos	6 Pólos	8 Pólos
0.75	77.4	79.6	75.9	66.2	80.7	82.5	78.9	75.0	83.5	85.7	82.7	78.4
1.1	79.6	81.4	78.1	70.8	82.7	84.1	81.0	77.7	85.2	87.2	84.5	80.8
1.5	81.3	82.8	79.8	74.1	84.2	85.3	82.5	79.7	86.5	88.2	85.9	82.6
2.2	83.2	84.3	81.8	77.6	85.9	86.7	84.3	81.9	88.0	89.5	87.4	84.5
3	84.6	85.5	83.3	80.0	87.1	87.7	85.6	83.5	89.1	90.4	88.6	85.9
4	85.8	86.6	84.6	81.9	88.1	88.6	86.8	84.8	90.0	91.1	89.5	87.1
5.5	87.0	87.7	86.0	83.8	89.2	89.6	88.0	86.2	90.9	91.9	90.5	88.3
7.5	88.1	88.7	87.2	85.3	90.1	90.4	89.1	87.3	91.7	92.6	91.3	89.3
11	89.4	89.8	88.7	86.9	91.2	91.4	90.3	88.6	92.6	93.3	92.3	90.4
15	90.3	90.6	89.7	88.0	91.9	92.1	91.2	89.6	93.3	93.9	92.9	91.2
18.5	90.9	91.2	90.4	88.6	92.4	92.6	91.7	90.1	93.7	94.2	93.4	91.7
22	91.3	91.6	90.9	89.1	92.7	93.0	92.2	90.6	94.0	94.5	93.7	92.1
30	92.0	92.3	91.7	89.8	93.3	93.6	92.9	91.3	94.5	94.9	94.2	92.7
37	92.5	92.7	92.2	90.3	93.7	93.9	93.3	91.8	94.8	95.2	94.5	93.1
45	92.9	93.1	92.7	90.7	94.0	94.2	93.7	92.2	95.0	95.4	94.8	93.4
55	93.2	93.5	93.1	91.0	94.3	94.6	94.1	92.5	95.3	95.7	95.1	93.7
75	93.8	94.0	93.7	91.6	94.7	95.0	94.6	93.1	95.6	96.0	95.4	94.2
90	94.1	94.2	94.0	91.9	95.0	95.2	94.9	93.4	95.8	96.1	95.6	94.4

Figura 59 - Rendimentos nominais segundo a norma IEC 60034-30-1, adaptado de [40].

6.4.1 Variadores Eletrónicos de Velocidade (VEV)

Os motores de indução são projetados para funcionarem a uma velocidade de rotação constante. No entanto, existem diversas aplicações em que essa velocidade não satisfaz as necessidades do processo. O funcionamento de um motor à sua velocidade máxima significa o máximo de energia consumida. Assim, e porque muitas das operações sairiam beneficiadas se a velocidade do motor fosse ajustada às necessidades reais, a utilização de VEV permite dar resposta a esta necessidade de ajustamento da carga do motor por variação da velocidade de rotação [39].

Os VEV podem controlar a velocidade dos motores por alteração da frequência de alimentação (50 Hz, no caso de Portugal) que, por sua vez, se refletirá na potência absorvida pelos motores e na sua velocidade de rotação.

A relação entre a potência e a velocidade de rotação de um motor elétrico (relacionada com a frequência) é dada pela lei das afinidades, Equação (63):

$$\left(\frac{\text{Potência}_1}{\text{Potência}_2}\right) = \left(\frac{\text{rpm}_1}{\text{rpm}_2}\right)^3 \quad (63)$$

Por sua vez, a relação entre a velocidade de rotação, a frequência e o número de polos é dada por:

$$\text{N}^\circ \text{ pólos} = \frac{120 \cdot f}{\text{rpm}} \quad (64)$$

Na Tabela 23 estão resumidos os potenciais ganhos energéticos com a redução da velocidade, com base na lei das afinidades. O consumo de energia sofre uma redução mais acentuada que a velocidade de rotação do motor, e a redução energética conseguida é tanto menor quanto mais baixa a velocidade de rotação.

Tabela 23 - Poupança de energia pela redução da velocidade [41].

Redução da velocidade (%)	Potenciais ganhos energéticos (%)
10	22
20	44
30	61
40	73
50	83
60	89

A introdução de VEV pode resultar numa economia da energia utilizada em motores industriais, e apresenta diversos benefícios [39]:

- Economia de energia;
- Aceleração e arranque controlados;
- Desaceleração e paragem controladas;
- Menor desgaste mecânico;
- Proteção contra curto-circuitos, sobretensões, quedas de tensão e faltas de fase.

Na *Costa Verde*, os motores elétricos associados aos ventiladores do sistema de despoeiramento estão equipados, cada um deles, com um variador de velocidade. Os VEV estão interligados entre si, garantindo assim um menor consumo para ambos os motores, de forma a manter a depressão adequada nas condutas de aspiração de ar.

A bibliografia [43] realizou um estudo para determinar a eficiência de motores elétricos a diferentes frequências e fatores de carga. Segundo [43], tem existido dificuldade em medir a eficiência de um motor elétrico quando este é controlado por um variador de

velocidade. Os autores verificaram que a eficiência de um motor elétrico quando este é controlado por um VEV, será muito semelhante à eficiência do motor quando este opera *across the line* (o motor funciona a 100 % da velocidade e com o binário máximo) [43].

Assim, para o caso em estudo e com base em [43], a eficiência dos motores elétricos não irá variar significativamente com a introdução do variador de velocidade. Para análise dos casos práticos será considerada a eficiência para 100 % da carga.

6.5 Sistemas de Transmissão Motor-Ventilador

Existem diversos tipos de sistemas de transmissão mecânica; contudo, os que irão ser objeto de estudo são os acoplamentos diretos (transmissão direta), e as transmissões indiretas por correias e por correntes, já que são aqueles que apresentam maior viabilidade de aplicação no sistema de despoeiramento da *Costa Verde* face à atual configuração.

6.5.1 Acoplamento Direto

Um acoplamento é um conjunto mecânico usado na transmissão de movimento de rotação entre duas máquinas (Figura 60). Quando se faz a união entre duas árvores usando um acoplamento mecânico é feita a transferência de potência e rotação, do lado motor para o lado movido da máquina acionada. Os acoplamentos apresentam uma eficiência de 99 % [44] [45].

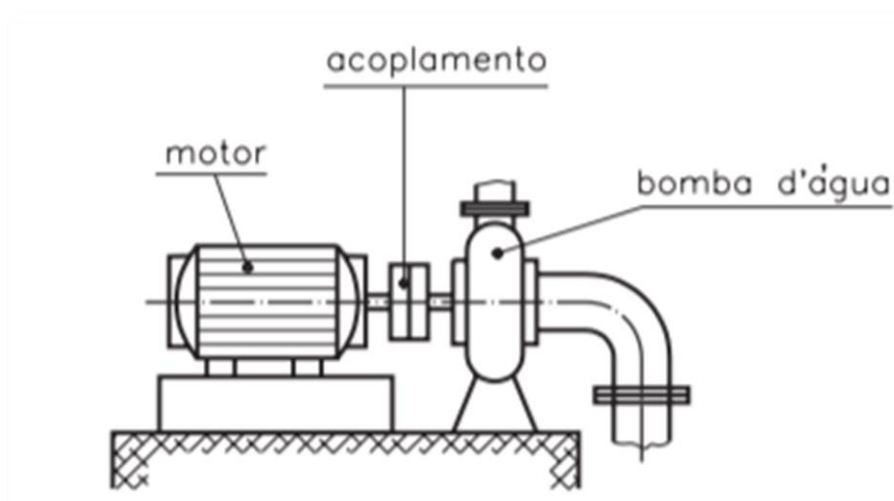


Figura 60 - Exemplo de um acoplamento direto motor-bomba [44].

Dependendo da exatidão do alinhamento, podem ser utilizados diferentes tipos de acoplamentos, os quais podem ser rígidos/fixos ou flexíveis [44] [45] [46]:

- Rígidos: servem para unir árvores de modo a que funcionem como se fossem uma única peça, alinhando-as de forma precisa. Não possuem qualquer flexibilidade, são torcionalmente rígidos e não absorvem choques nem vibrações. Também não admitem qualquer tipo de desalinhamento, seja radial, axial ou angular. Por isto, necessitam de um alinhamento perfeito entre os dois eixos acoplados;
- Flexíveis: suavizam os movimentos em árvores que tenham movimentos bruscos, e quando não existe a possibilidade de garantir um perfeito alinhamento entre os eixos. Significa que além da união entre uma árvore motora e uma árvore movida, têm de compensar desalinhamentos entre os eixos. Podem ser subdivididos em elásticos e não elásticos.

6.5.2 Transmissão por Correias

As correias fazem parte do grupo de sistemas de transmissão de movimento em que as máquinas motora e movida estão ligadas por um corpo intermédio com auxílio de polias. As correias são utilizadas para transmitir potência de uma árvore à outra (Figura 61). As duas polias formam um par cinemático quando unidas por um elemento flexível: a correia [43] [44].

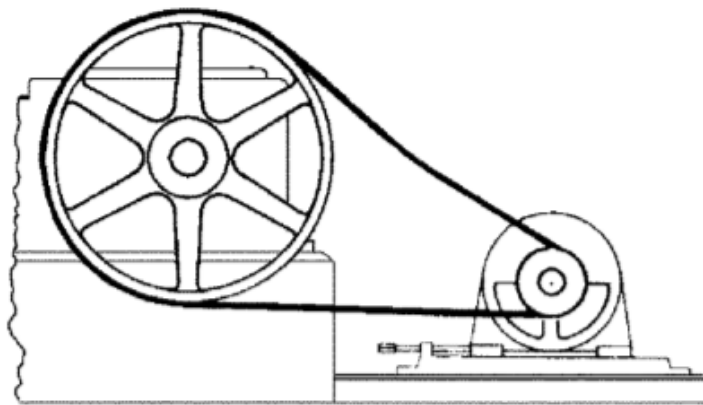


Figura 61 - Esquema de duas polias acopladas através de uma correia [44].

Dos diversos tipos de correias, as mais comuns são as planas, as trapezoidais (ou em “V”) e as dentadas (ou síncronas). A transmissão de potência com correias planas e trapezoidais é promovida pelas forças de atrito que se geram nas superfícies de contacto correia/polia [43] [44] [47] [48]:

- Correias planas: funcionam devido ao atrito que se gera entre as superfícies da correia e da polia, sendo necessário que exista uma força de pré-tensão para assegurar o funcionamento da correia. O limite inferior da pré-tensão está

associado ao evitar do escorregamento, e o limite superior está relacionado com as sobrecargas nos apoios e na própria correia. A pré-tensão tem como objetivo desenvolver forças de atrito para garantir a transmissão de potência. As correias planas, em serviço, deslizam, não transmitindo integralmente a potência, apresentando um rendimento de 96 a 98 %;

- Correias trapezoidais: são inteiriças, fabricada com seção transversal em forma de trapézio. Requerem menores pré-tensionamentos e, por isso, implicam menores cargas nos apoios. Com isto, consegue-se até 3 vezes mais capacidade de carga do que com correias planas. Apresentam menor escorregamento e um rendimento de 94 a 97 %;
- Correia dentadas: as correias dentadas permitem transmissões sem escorregamento. Transmitem potência com uma relação de transmissão constante, apresentam maior capacidade de carga, são mais compactas e não requerem pré-tensão. Contudo, são mais caras e requerem polias adequadas. Apresentam um rendimento de 98 %.

As transmissões por correias e polias apresentam algumas vantagens [44] [47] [48]:

- Baixo custo de investimento;
- Elevada resistência ao desgaste;
- Funcionamento silencioso;
- Flexíveis, elásticas e adequadas para grandes distâncias entre centros;
- Não necessitam, em geral, de sistemas de proteção contra as condições ambientais;
- Apresentam boa capacidade de absorção de choques;
- Rendimento elevado (94 a 98 %), mas com escorregamento de 1 a 3 %, em transmissão de potência.

6.5.3 Transmissão por Correntes

As correntes são muito usadas entre os diversos tipos de sistemas de transmissão de movimento existentes (Figura 62). A transmissão de potência é feita através do engrenamento entre os dentes da engrenagem e os elos da corrente. As correntes transmitem força e movimento, geralmente sem deslizamento [44] [47] [49].

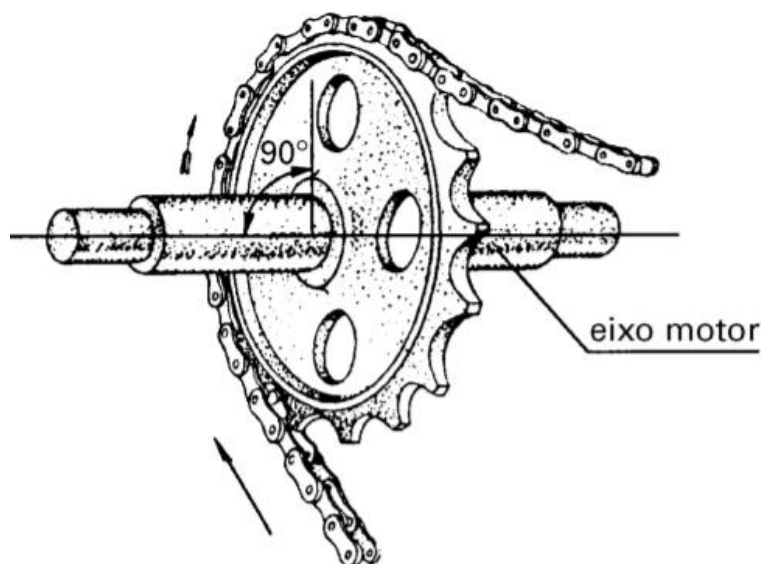


Figura 62 – Sistema de transmissão por corrente [44].

As correntes apresentam uma longa duração de funcionamento, sendo a sua manutenção fácil de realizar. Contudo, não apresentam capacidade de absorção de choques, como acontece com as correias, e são adequadas para operar em situações de menor velocidade. As correntes apresentam baixa resistência às condições ambientais, e requerem frequentemente sistemas de proteção e lubrificação, a qual deve ser feita com regularidade e com o método apropriado às condições de funcionamento, uma vez que o atrito que se gera sem lubrificação origina grandes perdas de potência e geração de calor. Apresentam um rendimento de 97 a 98 % [43] [44] [47] [49].

6.6 Casos de Estudo

No sistema de despoejamento da *Costa Verde*, a depressão associada ao ventilador está diretamente relacionada com o caudal de ar extraído e com a resistência ao seu escoamento. O pressostato existente na conduta antes do filtro de mangas regula a depressão imposta. É a partir deste valor lido pelo pressostato que o variador de frequência altera a velocidade de rotação do motor para adequar a potência à manutenção da depressão pretendida.

O sistema de despoejamento engloba os ventiladores (V), os motores (M), os sistemas de transmissão (ST) e os variadores de velocidade (VV), além das condutas do ar. Estes equipamentos têm rendimentos associados (Tabela 24) pelo que têm influência no desempenho geral do sistema de despoejamento.

Tabela 24 - Rendimentos prescritos dos equipamentos do sistema de despoeiramento.

Equipamento	Rendimento prescrito (%)
Variadores de velocidade (n_{VV})	97
Motores (n_M)	91,7
Correias trapezoidais (n_{ST})	94
Ventiladores (n_V)	75

Como os equipamentos estão em série, o rendimento total do sistema (n_T) é dado pelo produto dos rendimentos de todos os equipamentos do sistema (Equação (65) e Figura 63).

$$n_T = \prod_i n_i \quad (65)$$

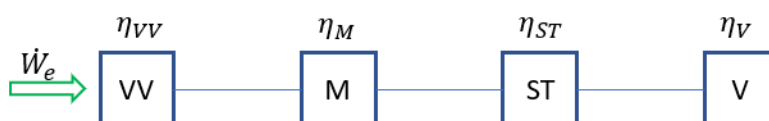


Figura 63 - Representação da série de equipamentos do sistema de despoeiramento.

O despoeiramento representou, em 2018, 1,72 % do consumo total de energia e 5,73 % do consumo de energia elétrica da empresa. A oportunidade de reduzir estes consumos é grande, através da alteração da depressão alvo e dos equipamentos.

Assim será feito o estudo da:

- Variação da depressão imposta aos ventiladores;
- Alteração dos motores elétricos de classe IE1 para motores de classe energéticas mais eficientes;
- Substituição dos ventiladores por ventiladores mais eficientes;
- Alteração do tipo de sistema de transmissão motor-ventilador.

6.6.1 Variação da Depressão Imposta

Quando o ventilador trabalha em depressão significa que está a retirar o ar do espaço fechado para o meio ambiente. Neste caso, está a aspirar o ar com partículas das naves industriais, maioritariamente pó cerâmico, para ser tratado no filtro de mangas antes de ser descarregado no meio ambiente.

A depressão atual imposta é de 11 mbar. O estudo feito varia a depressão, aumentando-a até aos 20 mbar. Quanto maior a depressão maior será o caudal de ar aspirado das naves industriais, garantindo melhores condições de trabalho e de saúde para os colaboradores, além das melhores condições dos equipamentos.

Tabela 25 - Variação da depressão e potência média horária associada.

Depressão (mbar)	Caudal (kg/s)	Caudal (m³/h)	Potência média horária (kW)
11	8,66	26.346	32,95
14	9,59	29.165	48,50
17	10,00	30.401	63,77
20	10,88	33.072	74,93

Na Tabela 25 e na Figura 64 encontram-se os consumos energéticos associados ao sistema do despoeiramento para vários valores da depressão imposta. Como expectável, o aumento da depressão aumenta o consumo de energia elétrica.

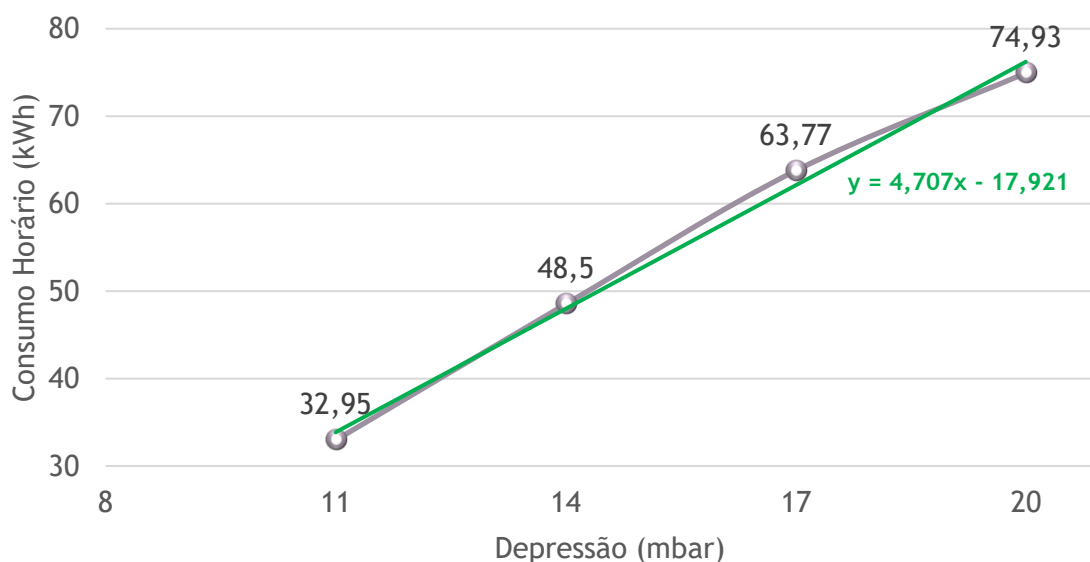


Figura 64 - Variação do consumo energético em função da depressão imposta.

Pode ser estimada uma equação linear (a verde na figura anterior) para representar a relação entre a depressão e o consumo de energia.

Considerando 7920 h de trabalho anuais, o consumo de energia para cada depressão considerada está representado na Tabela 26:

Tabela 26 - Consumo anual de energia para vários valores da depressão.

Depressão (mbar)	Consumo anual (MWh)
11	261,0
14	384,1
17	505,1
20	593,4

O consumo de energia aumenta linearmente com o aumento da depressão imposta. Comparando com a depressão atualmente imposta de 11 mbar, o aumento para 14 mbar iria significar o consumo extra de energia superior a 120 MWh anuais (um aumento de 47 % face ao estimado para a depressão de 11 mbar). Comparativamente a 2018, para a depressão imposta de 11 mbar o consumo anual de energia seria reduzido em cerca de 23 % enquanto para a depressão de 14 mbar significaria um aumento do consumo próximo de 12 %. Para 20 mbar, significaria um aumento estimado em 73 %.

6.6.2 Substituição dos Motores Elétricos

A alteração dos motores elétricos é uma das hipóteses para melhorar o rendimento do sistema de despoeiramento, diminuindo o consumo energético.

Para efetuar o estudo serão considerados os rendimentos teóricos consultados nos catálogos dos fabricantes para os motores elétricos a 100 % da carga. O estudo será feito para três casos distintos: valores de depressão imposta de 11 e 14 mbar, e combinando uma depressão imposta de 11 e 17 mbar. Os consumos obtidos para estes valores serão divididos em parcelas iguais, 50 % para cada motor (Tabela 27). A percentagem de velocidade foi calculada com base na Equação (63).

Tabela 27 - Consumo médio de energia para um motor elétrico do sistema.

Depressão imposta (mbar)	Consumo (kWh)	Consumo/motor (kWh)	Fator de carga (%)	% de velocidade
11	32,95	16,48	36,62	71,54
14	48,50	24,25	53,89	81,38
17	63,77	31,89	70,86	89,15

Os rendimentos dos motores usados estão resumidos na Tabela 28. Será feito o estudo para três motores, dois de classe energética IE3 e um de classe energética IE4.

Tabela 28 - Rendimento de motores elétricos, 45 kW de potência nominal, de 4 polos para diferentes fatores de carga e frequência de 50 Hz.

Marca	Classe	Rendimento (%)		
		50 % carga	75 % carga	100 % carga
A	IE3	93,7	94,1	94,4
	IE4	94,2	95,0	95,4
B	IE3	93,4	94,6	94,3
CV	IE1	91,7	92,1	91,7

O facto de os motores funcionarem com um variador de velocidade faz com que as perdas não sejam tão elevadas, já que este adequa a frequência (velocidade de rotação) em função da carga pretendida, permitindo uma redução do consumo de energia ao garantir que estes não funcionam perto da carga nominal. Como referido na secção 6.4.1, o rendimento dos motores não irá variar com a introdução do variador de velocidade, sendo considerado 100 % da carga.

A redução do consumo energético associada à mudança de um equipamento é dada pela Equação (66):

$$\text{Redução do consumo anual de energia} = \left(\frac{100}{\eta_{\text{old}}} - \frac{100}{\eta_{\text{novo}}} \right) \cdot P_{\text{motor}} \cdot t \text{ [kWh]} \quad (66)$$

onde:

- η_{old} é o rendimento do equipamento atual (%);
- η_{novo} é o rendimento do novo equipamento (%);
- P_{motor} é a potência medida do equipamento, em kW;
- t é o intervalo de tempo, em horas.

A primeira análise, para uma depressão imposta de 11 mbar, está resumida na Tabela 29.

Tabela 29 – Depressão imposta de 11 mbar (para um motor).

	CV	Marca A		Marca B
Classe	IE1	IE3	IE4	IE3
Rendimento (%)	91,7	94,4	95,4	94,3
Redução do consumo de energia (kWh)	-	4.071	5.520	3.924
Consumo anual (MWh)	130,5	126,5	125,0	126,6
Redução do consumo anual (%)	-	3,12	4,23	3,01

Com uma depressão imposta de 11 mbar, e efetuando a mudança para um motor de classe energética IE3, é estimada uma redução do consumo anual de energia em 3 % (valor médio), representando mais de 3 MWh anuais, face ao motor existente. Para um motor de classe energética IE4, a redução seria superior a 4 %, totalizando mais de 5 MWh anuais. O payback estimado para um motor IE3 é de 3,1 anos, contra um payback de 4 anos para um motor IE4.

Para uma depressão de 14 mbar, os dados estão apresentados na Tabela 30. A imposição de uma depressão mais elevada, comparada com os 11 mbar permite uma maior aspiração de pó das naves industriais, com o conseguinte aumento do consumo de energia.

Tabela 30 - Depressão imposta de 14 mbar (para um motor).

	CV	Marca A		Marca B
Classe	IE1	IE3	IE4	IE3
Rendimento (%)	91,7	94,4	95,4	94,3
Redução do consumo de energia (kWh)	-	5.990	8.123	5.775
Consumo anual (MWh)	192,1	186,1	183,9	186,3
Redução do consumo anual (%)	-	3,12	4,23	3,01

Pela comparação da Tabela 29 com a Tabela 30, verifica-se que a redução percentual do consumo anual de energia para a depressão de 14 mbar seria igual ao caso da depressão de 11 mbar, uma vez que o rendimento dos motores é o mesmo. Porém, a

redução do consumo de energia seria superior em valor absoluto, mais de 5,5 MWh para um motor IE3 e 8 MWh para um motor IE4, visto que o consumo por motor também é superior face ao aumento da depressão usada. O payback da alteração para um motor IE3 seria superior a 2,1 anos enquanto para classe IE4 seria superior a 2,7 anos.

A análise seguinte, Tabela 31, usando uma depressão combinada de 11 e 17 mbar, dependendo do horário de trabalho, é uma oportunidade quer de melhoria da diminuição do pó nas naves industriais quer de redução do consumo de energia do sistema de despoeiramento quando comparado com o estudo de 14 mbar.

A depressão de 11 mbar seria usada quando não existe movimentação de matérias-primas na secção de preparação de pasta, já que é nesta secção que existe maior quantidade de pó cerâmico. A depressão de 17 mbar seria usada no horário de produção e movimentação de matérias-primas, 6 h por dia, durante os dias úteis. O termo horário para a depressão de 11 mbar seriam 6480 h anuais e para a depressão de 17 mbar seriam 1440 h.

Tabela 31 - Depressão combinada de 11 e 17 mbar (para um motor).

	CV	Marca A		Marca B
Classe	IE1	IE3	IE4	IE3
Rendimento (%)	91,7	94,4	95,4	94,3
Redução do consumo de energia (kWh)	-	4.763	6.459	4.592
Consumo anual (MWh)	152,7	147,9	146,3	148,1
Redução do consumo anual (%)	-	3,12	4,23	3,01

Quando comparado com o estudo da depressão a 11 mbar, o aumento do consumo de energia é, em média, de 17 %. Por sua vez, para o estudo da depressão de 14 mbar, significaria uma redução do consumo na ordem de 20 %.

Analisando os três casos de estudo de substituição de motores, a melhor solução seria uma depressão combinada de 11 e 17 mbar, uma vez que permitiria uma redução da concentração de pó cerâmico nas naves industriais nas horas mais críticas, conjugado com um ligeiro aumento do consumo de energia face ao previsto (11 mbar). Contudo, com a alteração para um motor de classe energética IE3 o aumento anual do consumo energético do sistema de despoeiramento seria próximo de 14 %, com um payback de 3 anos. Para

um motor de classe energética IE4, o payback seria de 3,4 anos com o aumento do consumo anual de energia na ordem de 12 %.

6.6.3 Substituição dos Ventiladores

Os ventiladores possuem um ponto ótimo de funcionamento para um determinado caudal e uma determinada diferença de pressão, à qual as perdas inerentes ao escoamento são mínimas. A perda de carga é influenciada pela velocidade do fluido, resultando em atrito na conduta (perdas distribuídas) e pela resistência dos acessórios dispostos ao longo da conduta (perdas localizadas).

Uma medida, no que diz respeito aos ventiladores, é a sua manutenção, nomeadamente a limpeza das pás. Como o ar aspirado contém impurezas, mesmo sendo filtrado previamente, quando chega ao ventilador não está totalmente limpo. Após algum tempo sem uma limpeza das pás, começam a surgir incrustações nestas e a eficiência desce rapidamente.

A substituição do ventilador do tipo *radial tip blade* é outra medida que iria diminuir o consumo de energia, apesar de ser mais difícil avaliar o impacto desta mudança já que o ventilador converte energia mecânica em energia de pressão e energia cinética. Substituindo por um ventilador centrífugo de pás curvadas para trás, ou de pás inclinadas para trás, iria permitir uma poupança de energia uma vez que a eficiência destes ventiladores ronda os 80 %, comparando com os 75 % do ventilador atual. Existe, portanto, margem para um ganho de 5 % na eficiência do ventilador.

A alteração para um destes tipos de ventiladores está, maioritariamente, relacionada com a sua eficiência. O facto de não serem totalmente adequados para ambientes com poeiras não é um fator negativo, uma vez que o ar, após passagem pelo filtro de mangas, chega ao ventilador filtrado de poeiras. Assim, para os estudos seguintes foi escolhido o ventilador de pás curvadas para trás.

A substituição do ventilador será estudada para a depressão imposta de 11 mbar (Tabela 32), e para a depressão combinada de 11 e 17 mbar (Tabela 33). O cálculo é efetuado a partir da Equação (66).

Tabela 32 – Dados energéticos para a alteração de um ventilador para a depressão de 11 mbar (para um motor).

	Ventilador atual (radial tip blade)	Ventilador novo (pás curvadas para trás)
Eficiência teórica (%)	75	80
Redução do consumo de energia (kWh)	-	10.877
Consumo anual (MWh)	130,5	119,6
Redução do consumo anual (%)	-	8,33

Tabela 33 - Dados energéticos para a alteração de um ventilador para a depressão combinada de 11 e 17 mbar (para um motor).

	Ventilador atual (radial tip blade)	Ventilador novo (pás curvadas para trás)
Eficiência teórica (%)	75	80
Redução do consumo de energia (kWh)	-	12.726
Consumo anual (MWh)	152,7	140,0
Redução do consumo anual (%)	-	8,33

A substituição do ventilador atual por um ventilador com pás curvadas para trás, traduzir-se-ia numa redução teórica do consumo de energia superior a 10 MWh anuais para uma depressão de 11 mbar, e superior a 12 MWh anuais para a depressão combinada, representando mais de 8 % de redução do consumo anual de energia do sistema de despoeiramento. Estes valores foram calculados ignorando os problemas inerentes ao próprio sistema, como perdas de carga, incrustações nas condutas, entre outros, pelo que se fosse atingida uma redução de 4 % (metade do calculado) isso representaria mais de 5 MWh, para a depressão imposta de 11 mbar, e mais de 6 MWh, para a depressão combinada, de energia elétrica que não seriam consumidos anualmente, para um só ventilador.

A substituição dos ventiladores, considerando os dois casos abordados anteriormente, pode ser conjugada com a alteração dos motores elétricos. O ventilador para o qual foi efetuado o estudo é de pás curvadas para trás, considerando uma redução de 4 %, e os motores são de classe energética IE3, da marca B, e IE4, da marca A.

Na Tabela 34 estão resumidos os dados energéticos para a alteração do ventilador e do motor atualmente usados, para a depressão atual de 11 mbar, e na Tabela 35 para a depressão combinada de 11 e 17 mbar.

Tabela 34 - Dados energéticos para a alteração do ventilador e do motor para a depressão de 11 mbar (para um motor).

	Sistema atual (ventilador <i>radial tip blade</i> + motor CV)	Ventilador novo (pás para trás) +	
		Marca B IE3	Marca A IE4
Redução do consumo de energia (kWh)	-	9.199	10.728
Consumo anual (MWh)	130,5	121,3	119,8
Redução do consumo anual (%)	-	7,05	8,22

Tabela 35 - Dados energéticos para a alteração do ventilador e do motor para uma depressão combinada de 11 e 17 mbar (para um motor).

	Sistema atual (ventilador <i>radial tip blade</i> + motor CV)	Ventilador novo (pás para trás) +	
		Marca B IE3	Marca A IE4
Redução do consumo de energia (kWh)	-	10.763	12.553
Consumo anual (MWh)	152,7	141,9	140,2
Redução do consumo anual (%)	-	7,05	8,22

Pela Tabela 34 percebe-se que a alteração combinada do ventilador e do motor de classe energética IE3 traria uma redução do consumo energético do sistema de despoeiramento na ordem de 7 %, permitindo uma poupança superior a 9 MWh anuais. Por sua vez, um motor de classe energética IE4 apresentaria uma redução média superior a 8 % no consumo de energia, significando aproximadamente menos de 10 MWh anuais.

Já para a opção de uma depressão combinada, Tabela 35, a substituição dos equipamentos apresentaria uma redução percentual igual à retratada anteriormente. Contudo, o valor absoluto seria superior: cerca de 10,7 MWh para um motor IE3 e 12,5 MWh para um motor IE4. O consumo anual de energia seria superior face ao uso da depressão de 17 mbar, mas seria atenuado graças a motores de classe energética mais eficiente. Em termos absolutos, quando comparado com a depressão

de 11 mbar, esta alteração conduziria, no entanto, a um aumento no consumo energético na ordem de 20 MWh.

Assim, antes da substituição dos ventiladores é mais importante a substituição dos motores existentes por outros de classes energéticas superiores.

6.6.4 Substituição do Sistema de Transmissão Motor-Ventilador

A alteração do sistema de transmissão motor-ventilador é uma medida que pode aumentar a eficiência energética do sistema de despoejamento. Com base na secção 6.5, e sabendo que o acionamento dos ventiladores é por correia trapezoidal, é possível estimar o potencial de poupança efetuando uma mudança para acoplamento direto ou para correia dentada.

O Regulamento (UE) n.º 327/2011 da Comissão Europeia diz respeito aos requisitos de conceção ecológica de ventiladores acionados por motores com uma potência elétrica de entrada de 125 W a 500 kW. Define requisitos de conceção ecológica para a colocação no mercado e a entrada em serviço de ventiladores.

Este regulamento define alguns conceitos no âmbito de sistemas de transmissão de energia:

- **Transmissão direta:** sistema de transmissão de um ventilador em que o rotor está fixado no veio do motor, diretamente ou com um acoplamento coaxial, e no qual a velocidade do rotor é idêntica à velocidade de rotação do motor;
- **Transmissão:** sistema de transmissão de um ventilador que não é direto como na definição anterior. Nestes sistemas de transmissão inclui-se a transmissão por correia, caixa de velocidades ou acoplamento com deslizamento.

Os rendimentos médios a usar para o estudo da alteração do sistema de transmissão de energia mecânica encontram-se na Tabela 36.

Tabela 36 - Rendimentos médios dos sistemas de transmissão de energia mecânica [44] [46] [49].

Transmissão	Rendimento (%)
Correia Trapezoidal	94
Acoplamento Direto	99
Correia Dentada	98
Corrente	97

Com os valores médios dos rendimentos de cada tipo de sistema de transmissão de energia é possível fazer o estudo: para uma depressão imposta de 11 mbar (Tabela 37) e uma depressão combinada de 11 e 17 mbar (Tabela 38). Partindo da Equação (66) é possível calcular a redução do consumo de energia associado à mudança do sistema de transmissão de energia.

Tabela 37 - Alteração do sistema de transmissão de energia para uma depressão de 11 mbar (para um motor).

	Sistema Atual	Acoplamento Direto	Correia Dentada	Corrente
Rendimento teórico (%)	94	99	98	97
Redução do consumo de energia (kWh)	-	7.013	5.667	4.294
Consumo anual (MWh)	130,5	123,5	124,9	126,2
Redução do consumo anual (%)	-	5,37	4,34	3,29

Tabela 38 - Alteração do sistema de transmissão de energia para uma depressão combinada de 11 e 17 mbar (para um motor).

	Sistema Atual	Acoplamento Direto	Correia Dentada	Corrente
Rendimento teórico (%)	94	99	98	97
Redução do consumo de energia (kWh)	-	8.205	6.631	5.025
Consumo anual (MWh)	152,7	144,5	146,1	147,7
Redução do consumo anual (%)	-	5,37	4,34	3,29

A substituição do sistema de transmissão de energia motor-ventilador permitiria aumentar a eficiência energética do sistema de despoeiramento. A transmissão por correia trapezoidal é menos eficiente quando comparada com um acoplamento direto ou usando uma correia dentada. A mudança para acoplamento direto seria a que permitiria ao sistema obter menos perdas com a transmissão, mas tal implicaria a mudança da atual configuração do sistema de transmissão. A opção menos viável é a mudança para uma transmissão por corrente, uma vez que apresenta o menor rendimento das três comparações efetuadas, e está limitada pelo uso de velocidades inferiores. Seria necessário existir uma adaptação da transmissão, com a troca das polias, usadas pelas correias, por rodas dentadas para engrenamento com as correntes.

Com a mudança para acoplamento direto a redução do consumo anual de energia do sistema de despoeiramento seria superior a 5 %, representando mais de 7 MWh anuais para qualquer um dos casos de estudo apresentados anteriormente, sendo a opção mais adequada em termos de eficiência energética.

7. Sistema de Ar Comprimido

Os sistemas de ar comprimido (SAC) são grandes consumidores de energia elétrica numa instalação fabril, sendo utilizados na grande maioria dos processos industriais e, como tal, é importante a otimização da sua exploração. O principal requisito de um SAC é que este seja capaz de fornecer o caudal de ar necessário, a uma dada pressão, para a operação de um conjunto de equipamentos a jusante. Um SAC energeticamente eficiente é aquele que garante que apenas existe uma produção adequada às necessidades dos consumidores finais com um mínimo de consumo energético. Sendo assim, é necessário garantir que a qualidade do ar comprimido está em conformidade com o especificado pelo consumidor, e evitar a deterioração prematura de todos os componentes que compõem o SAC, com uma manutenção minuciosa e periódica [50] [51].

O ar comprimido é resultado de uma transformação sofrida pelo ar atmosférico através do consumo de trabalho mecânico de compressão realizado por um compressor, movido por um motor, geralmente, elétrico. Quer isto dizer que a perda de ar comprimido significa perda de energia elétrica. Na indústria Portuguesa, a produção de ar comprimido ocupa um lugar muito importante, sendo responsável por aproximadamente 20 % do consumo de energia elétrica neste setor. A produção de ar comprimido é dispendiosa, em parte devido ao baixo rendimento do processo, dado que apenas cerca de 10 % da energia elétrica fornecida aos compressores é convertida em energia mecânica no ar comprimido, com a restante energia a ser dissipada sob a forma de calor. Na Figura 65 estão representados os gastos médios de um SAC em 10 anos de laboração [50] [51] [52].

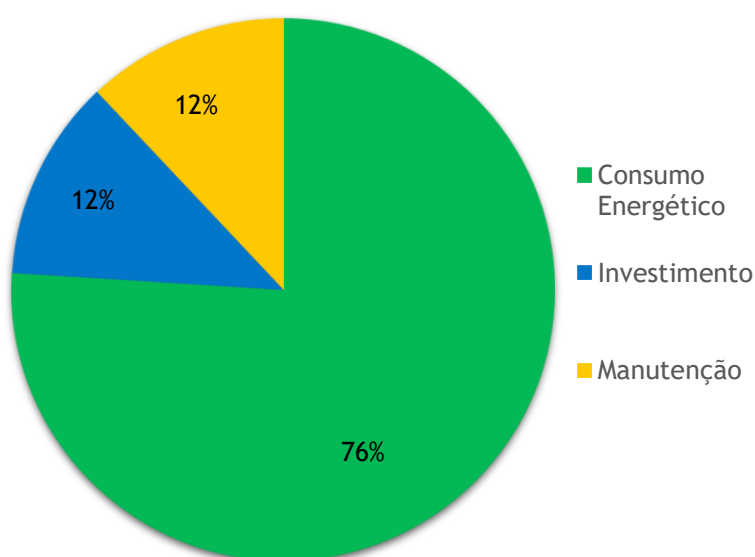


Figura 65 - Gastos médios de um SAC [51].

Na *Costa Verde*, no ano de 2018, o SAC foi responsável por 4,26 % do consumo total de energia e por 14,14 % do consumo de energia elétrica.

7.1 Constituintes de um Sistema de Ar Comprimido

Um SAC pode ser dividido em quatro secções distintas: produção, armazenamento, tratamento e distribuição. Assim, o desempenho de um SAC é dependente do desempenho de cada uma destas secções.

7.1.1 Produção

A compressão do ar é feita através de compressores. Um compressor é um “conversor” de energia, tendo como função comprimir gases a uma determinada pressão. Os compressores dividem-se em dois grandes tipos (Figura 66): volumétricos (deslocamento positivo) e dinâmicos [51].

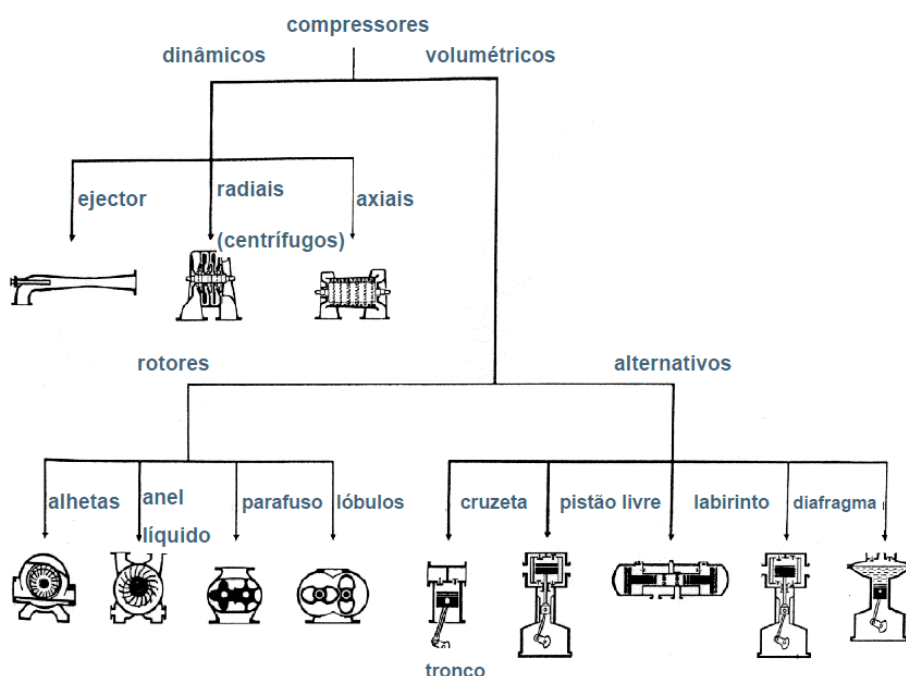


Figura 66 - Tipos de compressores [51].

Os compressores dinâmicos são mais utilizados em sistemas de pressões menores, mas onde é necessário um caudal mais elevado e essencialmente constante. Por sua vez, os compressores de deslocamento permitem obter uma gama de pressões superior a velocidades de rotação mais baixas. Nos compressores dinâmicos, a elevação da pressão é obtida por meio da conversão de energia cinética em energia de pressão (potencial),

durante a passagem do ar através do compressor. A compressão nos compressores de deslocamento consiste na redução de volume do gás numa câmara. O ar é admitido numa câmara de compressão, originando um aumento de pressão do ar quando o seu volume é reduzido [50] [52] [53].

Apesar da diversidade de compressores existentes, os compressores de pistão e os de parafuso são os mais utilizados na produção de ar comprimido. Os compressores de pistão têm como princípio básico de funcionamento o sistema biela – manivela, e são capazes de comprimir o ar a altas pressões funcionando com excelente desempenho mecânico. Apresentam, como desvantagens, a geração de oscilações de pressão além de um caudal de ar pulsante [50] [52] [53] [54].

Num compressor de parafuso, dois rotores paralelos trabalham em sentidos opostos dentro de um bloco. O volume do ar é progressivamente reduzido ao longo do parafuso, causando um aumento de pressão. Quando a pressão final é atingida, o ar é forçado a sair da câmara de compressão. As principais características são a produção contínua de ar e uma temperatura mais baixa no final da compressão. Devido ao facto de apresentarem um reduzido custo inicial e de possuírem uma manutenção mais fácil, são o tipo de tecnologia mais comum dos compressores rotativos, podendo ser arrefecidos a ar ou a água, e lubrificados ou isentos de óleo [52] [53] [54].

7.1.2 Armazenamento

Um SAC contempla, geralmente, um reservatório junto a todo o processo de produção. Este reservatório está sujeito a uma pressão interior superior à pressão atmosférica e destina-se, exclusivamente, a conter ar e demais condensados que surjam. O reservatório possui as seguintes funções [54]:

- Armazenar o ar comprimido;
- Compensar as flutuações de pressão no sistema de distribuição;
- Compensar picos de consumo;
- Arrefecer o ar auxiliando a eliminação do condensado;
- Estabilizar o caudal de ar.

Em Portugal, a instalação de um reservatório sob pressão deve respeitar a legislação em vigor: o anexo do Despacho n.º 1859/2003 (2.ª série). A classificação dos reservatórios é subdividida em três classes de perigo consoante a sua pressão máxima e o risco associado à instalação e funcionamento [55]:

- $P_{\text{máx,adm}} \times V \geq 30.000$, classe de perigo A;
- $15.000 \leq P_{\text{máx,adm}} \times V < 30.000$, classe de perigo B;
- $3.000 \leq P_{\text{máx,adm}} < 15.000$, classe de perigo C.

onde $P_{\text{máx,adm}}$ é a pressão máxima admissível, expressa em bar, e V o volume interno total do recipiente, expresso em litros.

Os reservatórios devem ser instalados de modo que todos os drenos, conexões e aberturas de inspeção sejam facilmente acessíveis, além de possuírem, no mínimo, um manómetro, uma purga de condensados e uma válvula de segurança com capacidade para escoar todo o caudal produzido pelos compressores [50] [52].

7.1.3 Tratamento

Os equipamentos mais modernos que utilizam ar comprimido necessitam que este esteja o mais possível livre de impurezas e seco (sem água na sua constituição). Para tal acontecer, o ar é sujeito a um processo de tratamento após a compressão. As impurezas contidas no ar atmosférico são normalmente invisíveis a olho nu, podendo danificar e reduzir a performance de funcionamento dos equipamentos [56] [57].

O ar atmosférico é uma mistura de gases (principalmente de oxigénio e nitrogénio) e contém contaminantes de três tipos básicos: água, óleo e poeiras. Durante o processo de compressão, o ar comprimido também é contaminado pelo óleo lubrificante do compressor, quando este é lubrificado por óleo. Quando o ar é comprimido, o volume ocupado pelo ar é reduzido e a concentração dessas impurezas aumenta bruscamente [57].

Com o tratamento do ar comprimido, existem diversos benefícios, tais como [57]:

- Aumento da vida útil dos equipamentos consumidores de ar comprimido;
- Melhoria na qualidade do produto final;
- Redução de custos com a aquisição de dispositivos de coleta para as linhas e a eliminação de condensado das linhas;
- Redução do consumo de energia, diretamente ligado à perda de pressão.

Verifica-se que é importante existir uma filtragem do ar para remoção dos contaminantes, e uma secagem para remoção da água do ar comprimido. O tratamento do ar deve respeitar a qualidade do ar exigida pela utilização particular em causa, porque

tratar o ar mais que o pretendido penaliza a eficiência do sistema, consumindo mais energia e aumentando as perdas de carga [50] [58].

A norma ISO 8573-1:2010 especifica as classes de qualidade do ar comprimido industrial para uso geral, nomeadamente a classe dos contaminantes (provenientes do próprio ambiente e da parte interna da tubulação do ar comprimido), a classe da água (proveniente da humidade contida no ar ambiente aspirado pelo compressor) e a classe do óleo (proveniente do contacto do ar com partes lubrificadas do compressor ou externo).

Tabela 39 – Qualidade do ar segundo a norma ISO 8573-1:2010 [58].

Classe de pureza	Partículas sólidas			Água	Óleo
	Número máximo por m ³			Ponto de orvalho (T _{dp})	Concentração máxima
	0,1 - 0,5 µm	0,5 - 1,0 µm	1,0 - 5 µm	°C	mg/m ³
0	Mais restrito do que a classe 1 ⁽¹⁾				
1	20.000	400	10	-70	0,01
2	400.000	6.000	100	-40	0,1
3	-	90.000	1.000	-20	1
4	-	-	10.000	3	5
5	-	-	100.000	7	25
6	-	-	-	10	-

(1) - A definição de uma classe 0 deve ser devidamente documentada, de acordo com a norma, pelo utilizador e o fornecedor do equipamento, não significando que não existe contaminação do ar comprimido.

As classes definem o tamanho e a concentração máxima de partículas sólidas, o máximo conteúdo admissível de água no ar comprimido sob pressão (T_{dp}), e a quantidade de óleos e hidrocarbonetos presentes. A temperatura de ponto de orvalho sob pressão (T_{dp}) é a temperatura à qual o ar atinge a saturação (humidade relativa a 100 %) à pressão de serviço. Significa que o teor de vapor água presente no ar passa (do estado gasoso) para o estado líquido [52] [58].

7.1.3.1 Filtros

Quando o ar é admitido no compressor, passa por um filtro de admissão que remove cerca de 30 % das partículas existentes no ar, e muito especialmente as maiores. Contudo, ao ser comprimido a concentração destas partículas por m³ aumenta até 700 % [54].

Para além das partículas, é comum a presença de óleos, sobretudo quando a produção de ar comprimido é realizada recorrendo a compressores lubrificados a

óleo. Estes contaminantes podem danificar os equipamentos, a rede de distribuição e comprometer a qualidade do produto final. Assim, uma medida para reduzir a quantidade de contaminantes no ar comprimido é a aplicação de filtros que permitem a remoção de partículas sólidas e óleos. Estes podem representar um custo extra na operação do SAC, dado que levam a um aumento do consumo de energia para compensar a perda de carga provocada pelo filtro [52] [54].

Os filtros são um importante meio de retenção de partículas e de óleos, e a sua localização pode ser antes e após o secador, dependendo da qualidade do ar desejada. Podem também estar instalados nos pontos de utilização do ar comprimido, para evitar que os contaminantes presentes ao longo da tubagem de ar comprimido atinjam a sua aplicação final. Os elementos filtrantes são geralmente apresentados em diferentes graus de filtração, utilizados conforme a aplicação do ar comprimido e a posição do filtro no sistema. O design dos filtros combina uma elevada eficiência de remoção de contaminantes com uma queda mínima de pressão, minimizando o consumo de energia do SAC. Podem ser divididos em quatro categorias [54] [57] [59]:

- Partículas: têm como função remover as partículas sólidas existentes no ar;
- Coalescentes: a coalescência é a ação pela qual partículas líquidas em suspensão se unem para formar partículas maiores. Combinam camadas para remoção de partículas finas e de suspensão: óleo e água. Três fenómenos combinados produzem o efeito da coalescência (Figura 67):
 - Interceção direta: partículas sólidas colidem com um componente de um meio filtrante que está no seu caminho, ou são capturadas por poros de diâmetros menores que o diâmetro da partícula;
 - Impacto inercial: processo no qual uma partícula colide com uma parte do meio filtrante devido à inércia da partícula;
 - Difusão: movimento rápido e aleatório de pequenas moléculas gasosas ou de partículas causado por uma variação de concentração.
- Adsorventes: são elementos filtrantes compostos por carvão ativado, com a finalidade de remover os vapores de hidrocarbonetos (óleo) do caudal de ar comprimido. A sua utilização está mais relacionada com a indústria alimentar e com a medicina;
- Microbiológicos: utilizados em aplicações de ar comprimido em indústrias de produtos farmacêuticos ou alimentares, em que a presença de microrganismos tem de ser evitada.

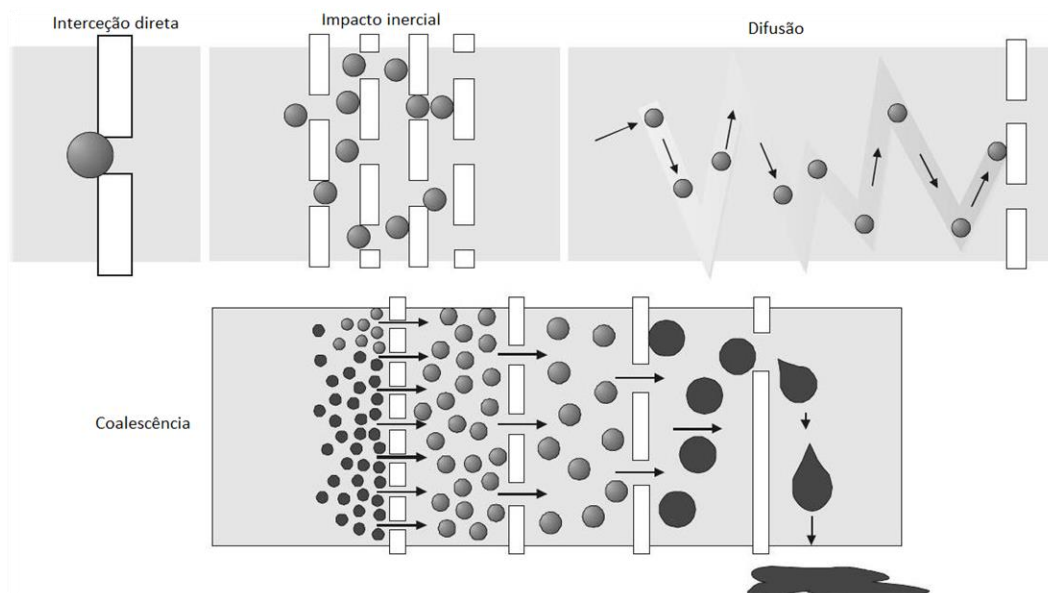


Figura 67 – Fenómeno da coalescência [57].

7.1.3.2 Secadores

Um secador deve estar apto a fornecer o ar comprimido com o ponto de orvalho (T_{dp}) - temperatura à qual o vapor começa a condensar - especificado pelo utilizador. De modo a tornar o processo de secagem do ar comprimido mais eficiente, é recomendando que o ar entre no secador com uma temperatura inferior a 35 °C, isento de óleo e de partículas sólidas [52] [59].

Existem vários tipos de equipamentos secadores de ar comprimido, com diferentes características de funcionamento e valores de T_{dp} , sendo que os principais são: refrigeração (cujo ponto de orvalho padrão é + 3°C) e por adsorção (com o ponto de orvalho mais comum de - 40°C) [51] [52] [54] [56] [59]:

- **Refrigeração:** o sistema de secagem consiste numa instalação frigorífica, onde o arrefecimento do ar comprimido dá origem à condensação do vapor de água nele contido. A gama de valores de T_{dp} está, geralmente, compreendida entre + 2 e + 10 °C, e limitada a valores de 0 °C, já que abaixo deste valor a água iria congelar e bloquear as passagens de ar. Podem ser classificados em arrefecimento a ar e arrefecimento a água. O circuito será abordado de forma mais detalhada na secção seguinte, quando for abordado o secador de ar comprimido da *Costa Verde*;
- **Adsorção:** O secador por adsorção caracteriza-se por remover os vapores do ar comprimido sem os condensar. A adsorção é o efeito de atração das moléculas de

gases e líquidos para a superfície de um sólido (material adsorvente), mantendo-as aderidas a si. O material adsorvente tem um alto poder de atração e retenção das moléculas de água sobre a sua superfície. São capazes de garantir valores de T_{dp} extremamente baixos, entre os -20 e -70 °C. Este tipo de secador de ar comprimido é, geralmente, constituído por duas unidades semelhantes (Figura 68): uma efetua a secagem enquanto a outra é regenerada (libertação da água acumulada na substância adsorvente), uma vez que o poder de atração das moléculas de água reduz à medida que o dessecante fica saturado. Esta regeneração pode ser realizada de várias formas: ar de purga, ar quente, calor de compressão ou recorrendo a ventiladores.

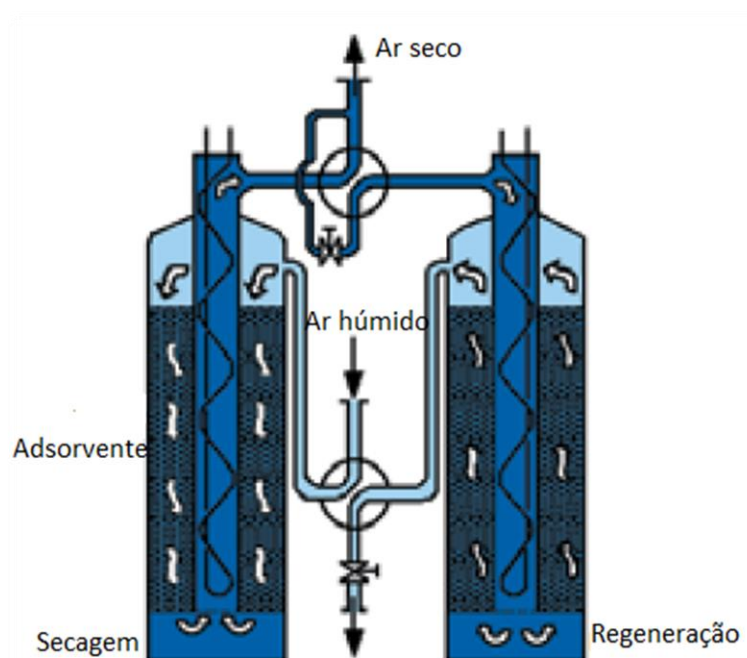


Figura 68 - Esquema da secagem de ar comprimido por adsorção [54].

Relativamente à instalação do secador, existem duas possibilidades: antes ou depois do reservatório de ar comprimido. A colocação antes do reservatório permite que o ar esteja seco no reservatório, garantido que não haverá condensados, e também uma qualidade do ar consistente. Como desvantagens apresenta o facto de o secador ser sobredimensionado para garantir que tem capacidade para receber todo o caudal de ar produzido pelo compressor, e a grande quantidade de condensados existente, entre outras. Já a colocação do secador de ar comprimido após o reservatório permite que o secador seja dimensionado de acordo com o consumo normal de ar comprimido, garantindo uma secagem contínua. Como desvantagens, ocorre a presença de

condensado no reservatório, que pode levar à sua corrosão, e a sobrecarga do secador se existirem picos excessivos de consumo de ar comprimido [53].

7.1.4 Distribuição

A rede de distribuição de ar comprimido tem como função transportar o ar comprimido da central de produção (geralmente do reservatório) até aos diversos utilizadores, com o mínimo de perdas de carga e de fugas possível. As redes de distribuição devem ser dimensionadas de modo a que as perdas de carga entre o secador e o ponto de consumo mais afastado não excedam os 0,5 bar [50] [60].

A queda de pressão imposta pela rede de distribuição deve-se, principalmente, a perdas por atrito nas canalizações (perdas de carga contínuas), aos estrangulamentos e mudanças de direção que existem nas válvulas e nas curvas (perdas de carga localizadas). De forma a não existirem elevadas perdas de carga na rede, esta deve ser projetada em anel (Figura 69), e o mais linear possível, à volta de toda a área fabril. Do anel deverão sair as ramificações necessárias para satisfazer os vários consumidores de ar comprimido [52] [60].

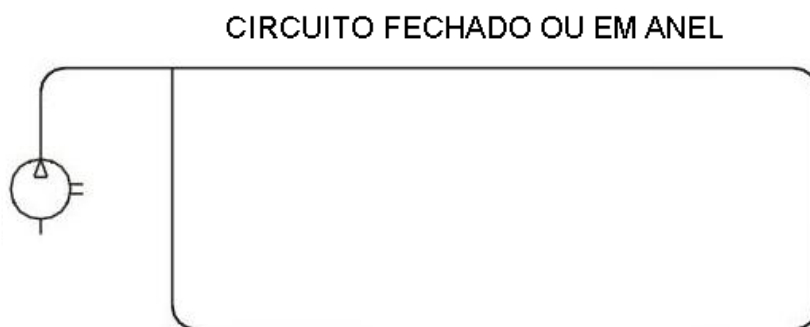


Figura 69 - Rede de distribuição de ar comprimido em anel [60].

A rede de distribuição de ar comprimido compreende todas as tubagens que saem do reservatório, passando pelo secador e que, unidas, orientam o ar comprimido até os pontos individuais de utilização. As linhas de uma rede de distribuição (Figura 70) podem ser divididas em três tipos [60]:

- Linha Principal: transporta o ar comprimido do compressor até à área de consumo;
- Linha de Distribuição: distribui o ar comprimido dentro da área de consumo;
- Linha de Serviço: leva o ar comprimido da linha de distribuição até ao local de trabalho.

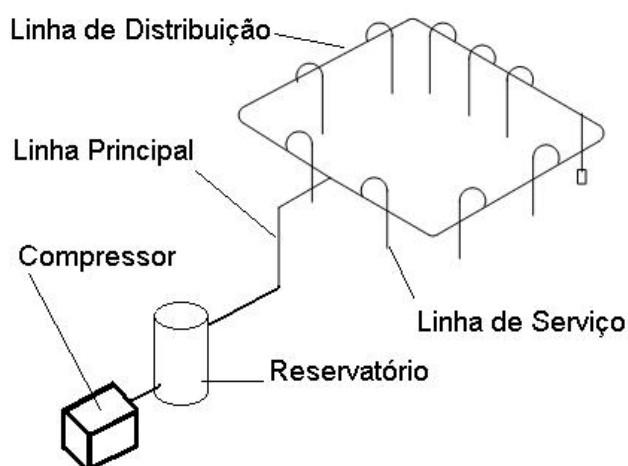


Figura 70 - Exemplo de uma rede de distribuição de ar comprimido [60].

Deverá também existir uma preocupação com o sobredimensionamento da linha, para garantir eventuais aumentos de consumo e de produção de ar comprimido, com o correto seccionamento da rede, de forma a existir um menor consumo com o encerramento de partes da mesma, e com a recolha de condensados. A preocupação também deve ser estendida à manutenção da rede, através da substituição de segmentos da tubagem em mau estado e da eliminação de fugas [50] [52] [54].

O seccionamento da rede pode ser efetuado através de válvulas de fecho na linha de distribuição (Figura 71). Estas são de grande importância na rede de distribuição, para permitir a sua divisão em secções, fazendo com que estas se tornem isoladas para inspeção, modificações e manutenção [54].

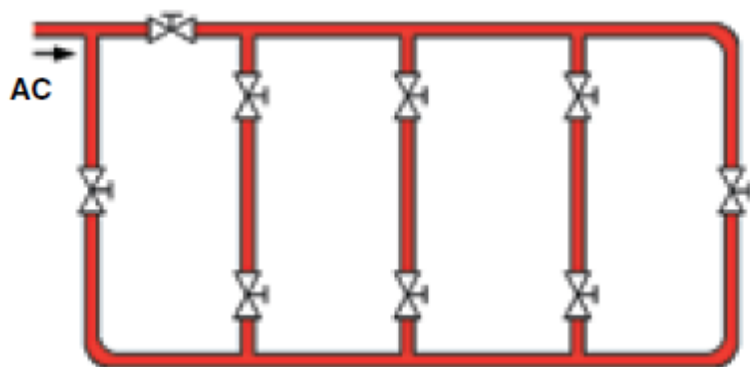


Figura 71 - Rede de distribuição de ar comprimido com válvulas de fecho (isolamento) [54].

Segundo a bibliografia [53] [54] [56], as fugas de ar comprimido são responsáveis, em média, pelo consumo de 15 a 20 % do total de ar comprimido. Um orifício de 1 mm corresponde a uma fuga de 1,2 L/s a uma pressão de 7 bar, sendo necessário um acréscimo de 0,46 kW de potência para suprir o consumo desta fuga. Para um bom

desempenho de todo o SAC, as fugas não devem ultrapassar 5 % do consumo total de ar comprimido [52] [54].

A construção da rede é muito importante, nomeadamente no que diz respeito aos materiais das tubagens. A seleção dos tubos que irão compor a instalação secundária e os materiais de que são fabricados são fatores importantes, bem como o tipo de acessórios ou conexões a serem utilizados. É ideal ter materiais de alta resistência e durabilidade, de preferência resistentes à oxidação, como aço galvanizado, aço inoxidável, alumínio ou cobre. A escolha das conexões deve oferecer recursos de montagem para redução de tempo de operação, ter dimensões compactas e não apresentar quedas de pressão assinaláveis [54].

7.2 Sistema de Ar Comprimido na *Costa Verde*

O SAC na *Costa Verde* é constituído por: compressores, reservatório, filtros coalescentes (DD: antes do secador e PD: após o secador), secador de refrigeração e pela rede de distribuição de ar comprimido. No entanto, apenas será abordado o tema dos compressores, dos filtros e do secador de refrigeração. O compressor, os filtros e o secador de ar comprimido são equipamentos da marca *Atlas Copco*, pelo que os componentes analisados e propostas de melhoria terão por base o fornecimento proveniente da *Atlas Copco*.

Um esquema representativo da configuração do SAC na *Costa Verde* está representado na Figura 72. O compressor GA 132 VSD, o secador por refrigeração e os filtros serão abordados de seguida.

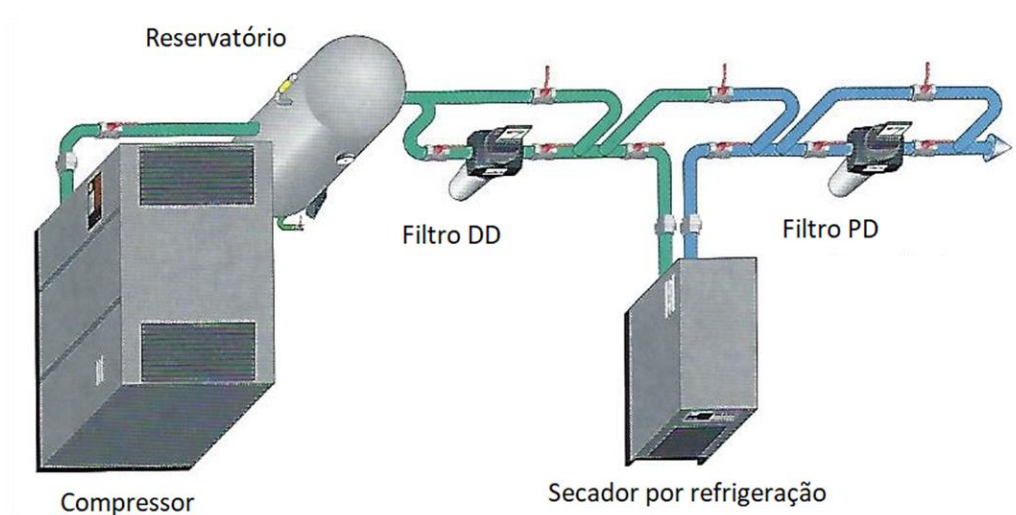


Figura 72 - Esquema representativo da configuração do SAC na *Costa Verde* [61].

7.2.1 Compressores

Na *Costa Verde* existem dois compressores: o compressor GA 132 e o compressor GA 132 VSD (Figura 73), ambos da *Atlas Copco*. O compressor usado, salvo paragem para manutenção ou eventual problema momentâneo, é o GA 132 VSD pelo que será o compressor aqui abordado.

O compressor GA 132 VSD (Variable Speed Drive - Acionamento de Velocidade Variável) é um compressor de parafuso de um estágio, com injeção de óleo, acionado por um motor elétrico com uma potência nominal de 132 kW. Através do ajuste contínuo da velocidade do motor de acionamento à pressão da rede de ar comprimido, o compressor otimiza o consumo de energia e reduz a banda de pressão de funcionamento. O variador de velocidade (VEV) varia continuamente a velocidade do motor, mantendo a pressão da rede tão próxima quanto possível do valor de pressão programado; deste modo, as flutuações de pressão serão muito reduzidas. Este compressor é arrefecido a ar [62].



Figura 73 - Compressor GA 132 VSD.

As especificações técnicas do compressor estão representadas na Tabela 40.

Tabela 40 - Especificações técnicas do compressor GA 132 VSD [62].

	Pressão de trabalho (bar)	⁽¹⁾ Capacidade FAD (L/s)	Capacidade FAD (m ³ /min)	Potência motor (kW)
Mínimo	5	104 - 485	6,2 - 29,1	132
Nominal	7	101 - 463	6,1 - 27,8	
Máximo	8,5	100 - 427	6 - 25,6	

(1) - Para a descarga livre efetiva de ar (FAD), o caudal de saída do compressor é calculado na condição de entrada padrão (pressão de entrada de 1 bar, temperatura de entrada de 20 °C e humidade relativa de 0%). FAD (Free Air Delivery) é a quantidade real de ar comprimido, medido à saída do compressor, nas condições de entrada do compressor. É utilizado para definir o caudal de ar na saída, quando medido nas mesmas condições que a entrada.

O esquema representativo do diagrama de fluxo do ar e do óleo encontra-se na Figura 74 [62].

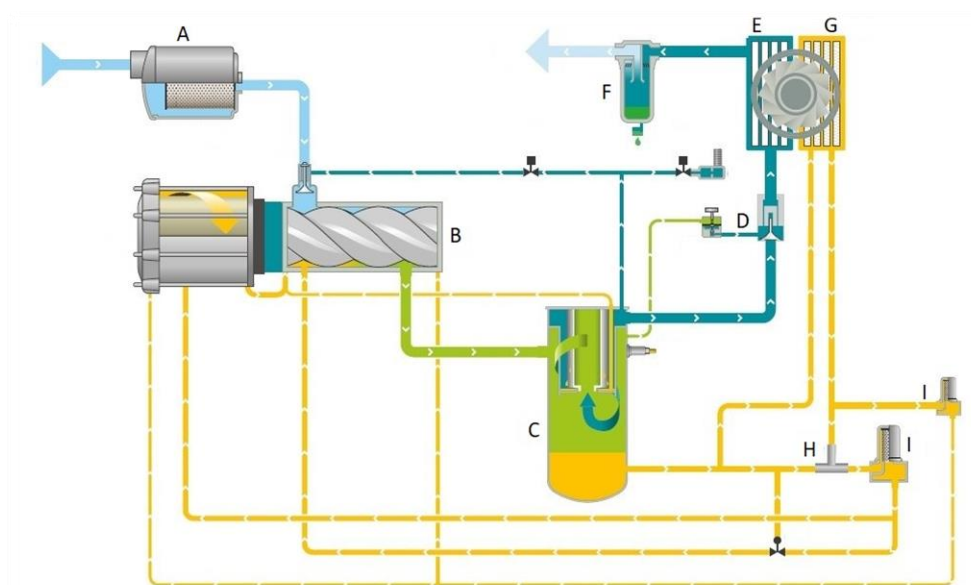


Figura 74 - Diagrama de fluxo de ar e de óleo do compressor GA 132 VSD [62].

- **Fluxo de ar:** O ar captado através do filtro (A) é comprimido no elemento compressor (B). O ar comprimido e o óleo são descarregados através da válvula de retenção para o reservatório de ar/separador de óleo (C), onde o óleo é separado do ar comprimido. O ar é expelido através da válvula de pressão mínima (D) para o arrefecedor de ar (E). Encontra-se instalado um coletor de condensados a jusante do arrefecedor de ar, para impedir os condensados de entrar no tubo de saída de ar. O coletor está equipado com uma válvula flutuadora para purga automática de condensados e com uma válvula de purga manual. (F). O ar arrefecido é descarregado através do coletor de condensados e da saída de ar, em direção à rede de ar comprimido. O ar é comprimido até uma gama de pressões de

6,5 a 7 bar. A válvula de retenção impede o retorno de ar comprimido, enquanto a válvula de pressão mínima impede a pressão do reservatório de cair abaixo de uma pressão mínima;

- Sistema de óleo: A pressão do ar força o óleo do reservatório (C), através do arrefecedor de óleo (G), dos filtros de óleo (I) e da válvula de corte de óleo, para o elemento compressor (B) e para os pontos de lubrificação. No reservatório de ar (C), a maior parte do óleo é eliminada do ar por centrifugação. Quase todo o óleo restante é eliminado pelo elemento separador. A válvula de corte de óleo impede os elementos compressores de ficarem inundados com óleo quando o compressor é parado. Já a válvula (H) faz o *bypass* ao arrefecedor de óleo (G) quando se arranca o compressor a frio, para assegurar o aquecimento rápido do óleo até à temperatura de trabalho normal. Os arrefecedores de ar e óleo são arrefecidos por ventiladores.

O consumo de energia dos compressores foi consultado no portal da *Galp*. Com os valores retirados, foi elaborado um diagrama de carga (Figura 75) para conhecer a distribuição do consumo de energia elétrica durante uma semana.

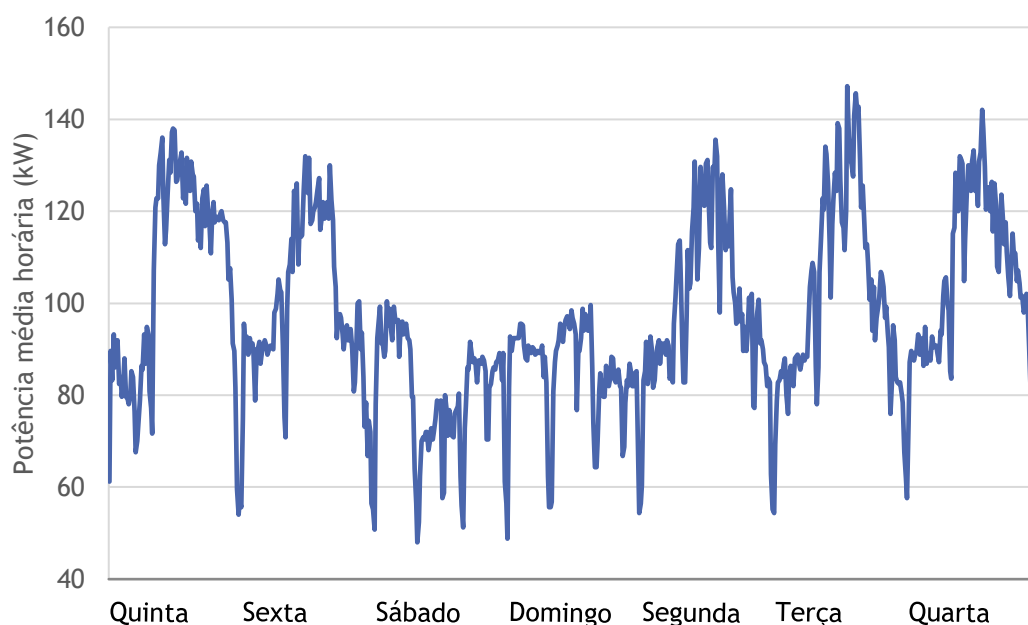


Figura 75 - Diagrama de carga do compressor.

Pela análise Figura 75, fica perceptível a variação do consumo de energia elétrica consoante o dia de semana e o horário. Os picos de consumo dizem respeito ao horário de maior laboração da empresa, em dias de semana. Ao fim de semana, o consumo de energia é inferior. A grande vantagem de um compressor VSD é este ajustamento do

consumo de energia face ao consumo de ar comprimido, o que permite uma redução do consumo energético. Um compressor que trabalha com um controlo carga/vazio funciona entre dois pontos de pressão programados. Quando é atingida a pressão máxima, o compressor passa para a condição de vazio. Durante os períodos de necessidades médias ou baixas, o consumo de energia em vazio pode ser excessivo, desperdiçando grandes quantidades de energia.

O consumo de ar comprimido não é diretamente mensurável. Existe uma forma, indireta, de fazer a estimativa do consumo de ar a partir do consumo de energia dos compressores, conseguido através da consulta do portal da *Galp*, e com base no *Compressed Air & Gas Institute* (CAGI). Para uma pressão nominal de 6,9 bar, considerando que *acfm* é “actual cubic feet per minute” e que *scfm* é “standard cubic feet per minute” [63] [64]:

$$acfm = scfm \times \frac{P_{stan}}{P_{atm}} \times \frac{T_{atm}}{T_{stan}} \quad (67)$$

onde:

- P_{stan} é a pressão atmosférica absoluta em condições standard: 1 atm;
- P_{atm} é a pressão atmosférica absoluta segundo o CAGI: 0,9866 atm;
- T_{stan} é a temperatura (em K) em condições standard: 288 K (15 °C);
- T_{atm} é a temperatura (em K) segundo o CAGI: 293 K (20 °C).

A Equação (67) é uma adaptação da lei dos gases perfeitos. Quando um gás é submetido a uma transformação que não envolva alteração na quantidade de matéria, é possível relacionar os estados final e inicial do sistema:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (68)$$

Com o valor calculado de *scfm* é possível calcular o caudal para as condições atmosféricas em Vagos (*acfm_{VAG}*). A temperatura média é de 288,6 K (15,6 °C) e a pressão é de 1 atm. Após isto, é feita a conversão para m³/min:

$$\text{Caudal} = acfm_{VAG} \times 0,4719 \times 0,06 \text{ m}^3/\text{min} \quad (69)$$

As constantes da Equação anterior representam os fatores de conversão para L/s e para m³/min. Na Tabela 41 estão representados os consumos baseados na *data sheet* retirada do CAGI [63], sendo que a potência e caudal CAGI são valores reais obtidos em testes. Os restantes são estimados a partir dos anteriores:

Tabela 41 – Produção e potência estimada do compressor GA 132 VSD [63].

Potência (kW)	Caudal CAGI (acfm)	Caudal (m ³ /min)	Potência Específica (kW/(100m ³ /h))
171,8	985	27,1	10,56
154,2	893	24,6	10,46
140,6	817	22,5	10,42
127,4	741	20,4	10,41
102,2	587	16,2	10,54
54,1	270	7,4	12,13

Com os dados calculados e apresentados na Tabela 41 foi elaborada a Figura 76 e, posteriormente, calculada uma Equação polinomial de 3º grau que caracteriza a relação entre a potência consumida pelo compressor e o caudal de ar comprimido produzido. Assim, é possível relacionar o caudal de ar comprimido produzido com a potência média do compressor.

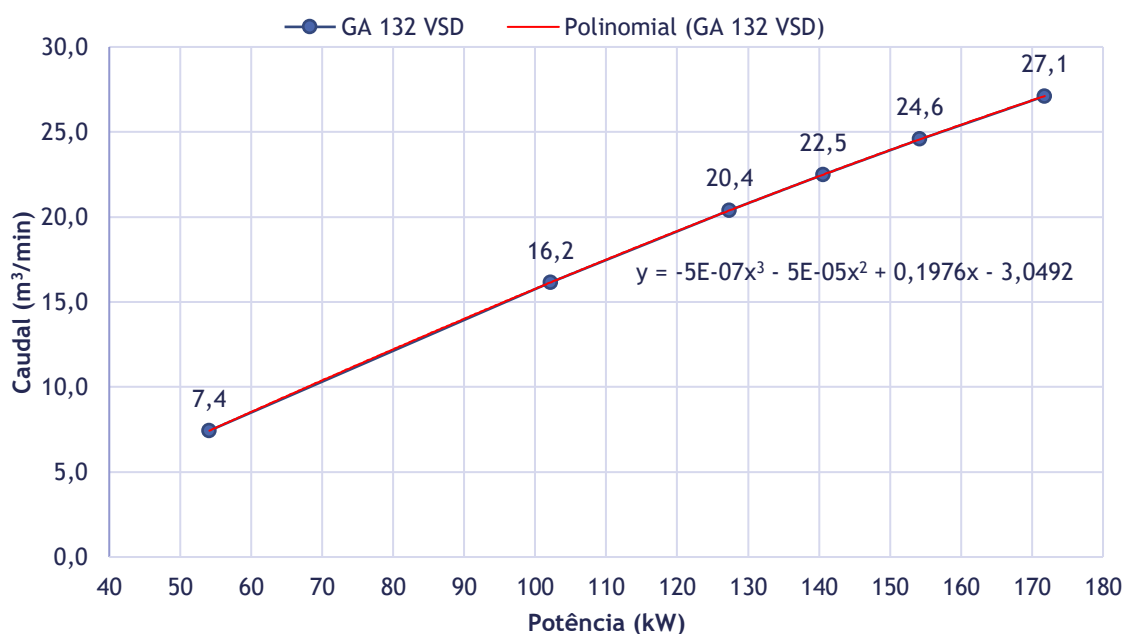


Figura 76 - Potência vs caudal do compressor GA 132 VSD.

Analisando os valores dos consumos de energia através do portal *Galp*, é possível efetuar uma média do consumo de energia pelo compressor (Tabela 42):

Tabela 42 - Consumos de energia pelo compressor GA132 VSD.

	Consumo (kWh)	Caudal (m ³ /min)	Potência específica (kW/(100m ³ /h))
Mínimo	48,0	6,3	12,77
Médio	96,6	15,1	10,65
Máximo	147,2	23,4	10,50

O ar comprimido, depois de sair do compressor, segue para um reservatório com capacidade de 4.000 L. Depois do reservatório segue para o secador de refrigeração.

7.2.2 Secador de Ar Comprimido

O secador de ar comprimido na *Costa Verde* é um secador de refrigeração FD 560, arrefecido a ar, da *Atlas Copco*.

O secador FD 560 elimina a humidade do ar comprimido, arrefecendo-o quase até atingir o ponto de congelação. Este processo causa a condensação da água e do óleo, sendo os condensados purgados automaticamente. O ar é aquecido antes de sair do secador, e o condensador tem um ventilador de arrefecimento comandado por um pressostato [65].

Um secador de refrigeração arrefecido a ar apresenta um esquema semelhante ao apresentado na Figura 77 [65]:

- Circuito de ar: o ar comprimido à entrada (A) é arrefecido no permutador de calor ar/ar (B), passa através do permutador de calor ar/refrigerante (C) onde sofre um arrefecimento até + 3 °C (T_{dp}). O condensado é separado do ar e purgado automaticamente pelo separador de água (D). Antes de sair (E), o ar seco passa pela segunda vez pelo permutador de calor ar/ar para ser reaquecido;
- Circuito refrigerante: do compressor (F), o gás refrigerante entra no condensador (G) onde é arrefecido por um ventilador de arrefecimento e passa a líquido. Uma válvula de expansão regulada pela pressão (H) regula o débito no permutador de calor ar/refrigerante (C), onde o refrigerante evapora extraindo calor do ar comprimido. Então, a pressão do refrigerante aumenta no compressor e o ciclo começa novamente.

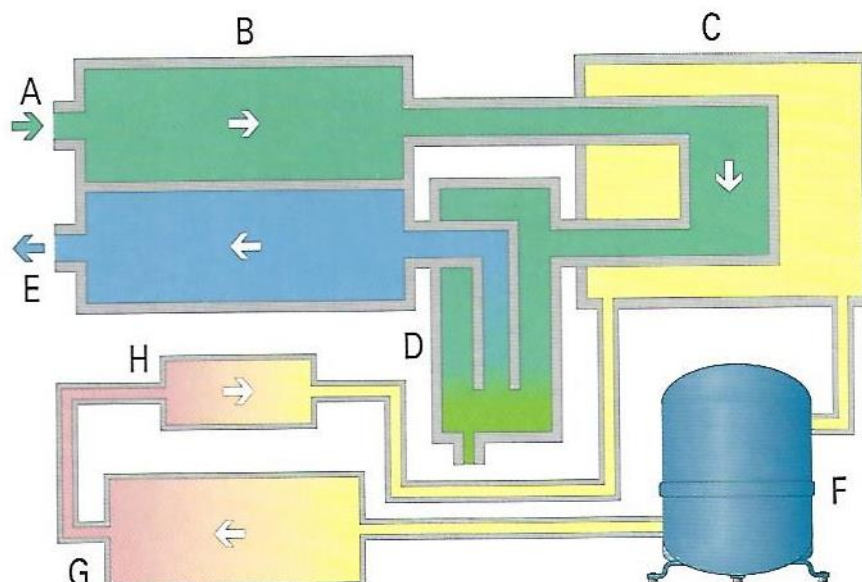


Figura 77 - Secador de refrigeração FD 560 [65].

Na Tabela 43 estão recriadas algumas características associadas ao secador FD 560.

Tabela 43 - Características do secador de ar comprimido FD 560.

Potência (kW)	6,95
Perda de carga (bar)	0,21
$P_{\text{máx}}$ ar comprimido (bar)	14,5
$T_{\text{máx}}$ ar comprimido (°C)	55
$T_{\text{máx}}$ ambiente (°C)	45
T_{min} ambiente (°C)	0
Caudal (L/s)	560
Refrigerante	R404A

7.2.3 Filtros

Os filtros descritos são da empresa *Atlas Copco*. Como referido anteriormente, o ar atmosférico apresenta muitas impurezas. É, então, fundamental um sistema de filtragem adaptado, que reduza todos os tipos de contaminantes a partir da fonte, de modo a que a economia e a eficiência da operação sejam o mais elevadas possível [61].

O SAC apresenta dois filtros instalados: um filtro DD antes do secador (atualmente não está ativo) e um filtro PD após o secador [61]:

- Filtros DD: filtros coalescentes para proteção de ordem geral, que removem água líquida e aerossol de óleo de $0,1 \text{ mg/m}^3$ e partículas até $1 \text{ }\mu\text{m}$;
- Filtros PD: filtros coalescentes de alta eficiência, que removem água líquida e aerossol de óleo de $0,01 \text{ mg/m}^3$ e partículas até $0,01 \text{ }\mu\text{m}$.

A perda de carga associada aos filtros está resumida na Tabela 44:

Tabela 44 - Perda de carga (bar) dos filtros DD e PD [61].

Filtro	DD	PD
Ar húmido (bar)	0,12	0,20
Ar seco (bar)	0,05	0,08

Os filtros descritos otimizam os três mecanismos de filtração (intercepção direta, impacto inercial e difusão) enunciados na secção 7.1.3.1.

7.3 Medidas de Eficiência Energética

Cerca de 6 mil milhões de toneladas de ar são comprimidas por ano em todo o Planeta, gerando um consumo de 500 mil milhões de kWh. Estes números provocam um grande impacto no meio ambiente, mas que podem ser substancialmente reduzidos com medidas racionais. É importante ter em mente que o consumo racional do ar comprimido deve ser uma preocupação, e que o uso e manutenção inadequados dos SAC provocam uma redução no desempenho global caracterizando uma fonte de elevados desperdícios [53] [54] [59].

Seguidamente são apresentadas algumas medidas de eficiência energéticas.

7.3.1 Local da Instalação do Compressor

O local de instalação (sala dos compressores) do sistema de produção de ar comprimido é importante, na medida em que um mau planeamento e projeto das condições da sala afeta diretamente o consumo energético. Para sistemas já instalados cabe uma análise da recolocação em locais mais frios, ou o arrefecimento do local da instalação. O compressor de ar deve ser instalado numa área bem ventilada, de modo a captar o ar mais frio possível. Segundo a bibliografia [53] [54] [56], a redução de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ na temperatura de admissão do ar gera poupanças energéticas na ordem de 1 %, porque quanto mais baixa for a temperatura do ar aspirado maior será a massa de ar que poderá ser aspirada pelo

compressor para o mesmo caudal volumétrico, isto porque o ar mais frio é mais denso [52] [53] [56] [59].

A Tabela 45 relaciona as temperaturas do ar aspirado e a variação do consumo energético, tendo por referência os 21 °C [53].

Tabela 45 - Variação do consumo energético com a temperatura de aspiração [53].

Temperatura do ar de aspiração (°C)	Variação do consumo energético (%)
4	- 5,7
10	- 3,8
16	- 1,9
21	0,0
27	+ 1,9
32	+ 3,8
38	+ 5,7
43	+ 7,6

A sala de produção de ar comprimido deve ter a menor temperatura possível. Contudo, há limites de temperatura, quer máximos quer mínimos, que a sala dos compressores deve apresentar [66]:

- A temperatura mínima é de + 5 °C, porque as tubagens ou válvulas podem congelar caso a temperatura seja inferior a + 5 °C. Os secadores de refrigeração congelam quando a temperatura é inferior a 0 °C;
- A temperatura máxima aconselhada é + 40 °C. Se a temperatura da sala sobe acima deste valor, a temperatura de saída do comprimido também ultrapassará o valor máximo permitido. Outros fatores são a má qualidade do ar comprimido e um maior esforço de todos os equipamentos.

Por fim, devem ser garantidas as condições ambiente favoráveis à produção de ar comprimido, nomeadamente no aspeto da temperatura ambiente, humidade, ventilação e contaminação do ar de admissão. As grelhas de admissão de ar devem estar livres de obstruções e, preferencialmente, estar localizadas em fachadas viradas a Norte e em áreas com pouca exposição solar [52].

7.3.2 Redução de Fugas

A quantidade de ar comprimido perdida através de pequenos orifícios, acoplamentos com folgas, vedações defeituosas, entre outros, quando somadas atingem elevados consumos energético e financeiro. Ao projetar uma nova instalação ou, reformar ou ampliar uma já existente, devem ser adotadas tubagens com diâmetro 10 % maior que o calculado. Tal medida pode trazer uma redução de 32 % nas perdas da carga, e reduzir a probabilidade de fugas.

Na Tabela 46 estão resumidos, para diferentes diâmetros de orifícios, a potência adicional estimada que o compressor requer para compensar estas perdas, e o custo anual das fugas de ar comprimido associadas ao orifício, para uma pressão de 6,9 bar [54].

Tabela 46 - Fuga de ar comprimido através de orifícios, potência perdida e custo adicional anual estimado [54].

Diâmetro (mm)	Caudal (L/s)	Potência (kW)	Custo Anual (€)
0,1	0,0127	0,0049	4,2
0,2	0,0467	0,0179	15,4
0,3	0,1081	0,0415	35,5
0,5	0,3002	0,1152	98,7
1	1,20	0,46	394
1,5	2,70	1,04	888
2	4,80	1,84	1.580
3	10,83	4,15	3.560
4	19,19	7,36	6.310
5	30,04	11,53	9.877

Pela análise da tabela, percebe-se que as fugas são um fator preponderante para o consumo de energia pelo compressor. Constata-se que é importante uma manutenção preventiva da rede, de modo a que as fugas sejam mantidas reduzidas. É impossível eliminar por completo todas as fugas, mas com a análise e manutenção minuciosa de toda a rede 2 vezes por ano, sendo verificada as juntas de vedação defeituosas, engates, tubagens, apertos das conexões, entre outros, é possível diminuir as fugas de ar comprimido de forma drástica, ou mantê-las em níveis aceitáveis.

7.3.3 Medidas de Aumento de Eficiência Energética

Existe muita pesquisa na área da eficiência energética dos SAC. Algumas das medidas propostas são mais teóricas, podendo apresentar melhorias acima do verificado na prática. Apesar de muitas destas medidas serem comuns, convém realçar que cada SAC deve ser avaliado como um caso particular, e que o potencial de poupança pode não ser o esperado considerando as medidas teóricas [52] [54].

A gestão de um SAC não passa apenas pela otimização do funcionamento da produção de ar comprimido. A utilização do ar comprimido requer o compromisso de todos os intervenientes na aplicação de boas práticas, desde a sua produção até ao utilizador final, com o objetivo de melhorar a eficiência energética do SAC, garantindo uma produção mais sustentável [67].

Primeiramente, é importante identificar as oportunidades e, posteriormente, fazer a seleção das oportunidades que podem ter mais impacto no SAC específico [50] [52] [53] [54] [67]:

- Análise regular das tubagens de ar comprimido, detetando e eliminando possíveis fugas;
- Reparação ou substituição de equipamentos com fugas de ar comprimido;
- Instituição de um programa regular de verificação de fugas de ar comprimido;
- Otimização dos recursos disponíveis para a produção e tratamento de ar comprimido, tendo em vista a redução dos custos energéticos;
- Secar e filtrar moderadamente o ar, de acordo com as necessidades industriais. Secar ou filtrar mais que o necessário leva a um aumento do consumo energético (devido às maiores perdas de carga);
- Instalação de um recuperador de calor no compressor, já que de toda a energia elétrica consumida pelos compressores cerca de 80 % é convertida em calor, que pode ser aproveitada como energia térmica para aquecimento de água ou de ar. Contudo, face às elevadas temperaturas dos fornos existentes na *Costa Verde*, e ao facto de já ser aproveitado grande parte do calor dos mesmos, a aplicação desta medida não traria benefícios face ao investimento a fazer;
- Aumento do diâmetro das tubagens reduz as perdas de carga. Uma rede de distribuição eficiente permite uma perda de carga máxima de 0,5 bar ao longo do seu comprimento;

- Divisão da rede de distribuição em troços com controlos de pressão ou válvulas de seccionamento adequadas, e isolar/fechar troços da rede que estão fora de serviço;
- Otimização da pressão do ar comprimido do sistema em função dos dispositivos de utilização final;
- Aumento da capacidade do reservatório principal de ar comprimido;
- Instalação de reservatórios suplementares de ar comprimido próximos de cargas variáveis e dos maiores consumidores.

Além das medidas referidas anteriormente, existem meios de medição efetiva de consumos de energia, caudais e perdas de carga, que poderiam ser adquiridos de forma a existir um maior controlo da quantidade de ar produzido e consumido [67]:

- Instalação de caudalímetros para monitorizar os perfis de consumo de ar comprimido;
- Sensores de pressão para permitir monitorização das perdas de carga.

As economias de energia são mais facilmente conseguidas a partir da fase de projeto e, portanto, aquando da instalação de raiz de um SAC novo; mas também são possíveis, numa menor escala e com maior complexidade, pela substituição/melhoria dos principais componentes de um SAC existente [67].

7.3.4 Comparação do Compressor GA 132 VSD vs GA 132

Como referido anteriormente, a *Costa Verde* tem dois compressores, com sistemas de controlo distintos: um de velocidade variável (GA 132 VSD) e um de carga/vazio (GA 132), ambos com uma potência nominal de 132 kW. O compressor de carga/vazio apenas entra em ação quando o compressor de velocidade variável está em manutenção ou apresenta algum problema de funcionamento.

O sistema de controlo por velocidade variável foi abordado na descrição do compressor GA 132 VSD, na secção 7.2.1. Já o sistema de carga/vazio funciona através da definição de uma faixa de pressão de trabalho. Quando o compressor atinge a pressão mínima estabelecida, entra em “carga”, comprimindo ar para a rede, e quando atinge a pressão máxima o compressor entra em “alívio”, abrindo uma válvula interna, não realizando a compressão do ar. Porém, o motor continua em funcionamento durante algum tempo, consumindo cerca de 20 % da energia necessária para operar o compressor a plena carga [52] [53] [58].

Na Figura 78 está representada a comparação dos consumos energéticos de ambos os compressores durante uma semana (em semanas distintas pois nunca trabalham em simultâneo).

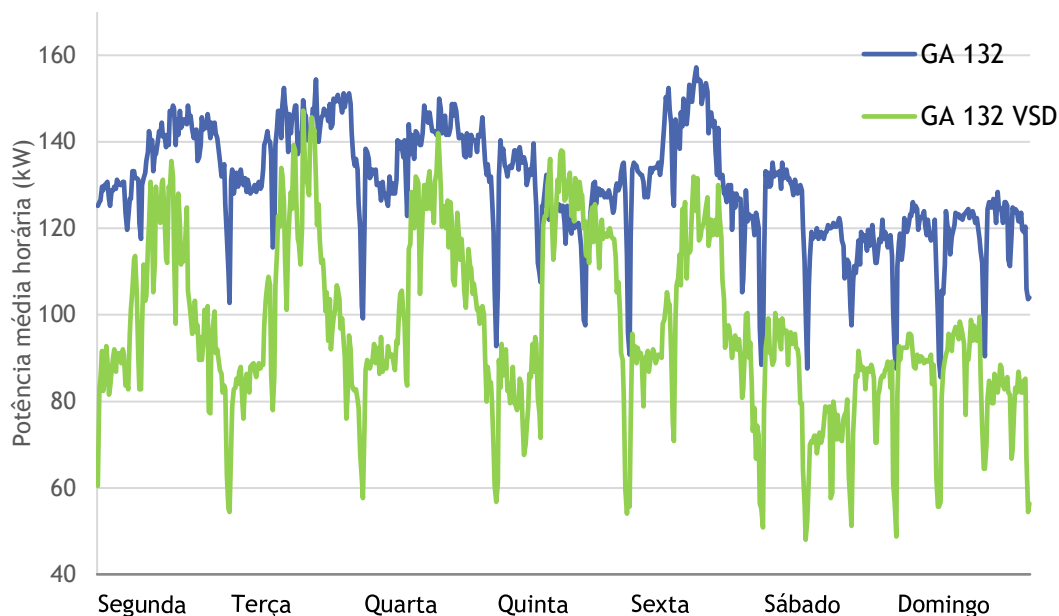


Figura 78 - Comparação do diagrama de carga do compressor GA 132 VSD com o compressor GA 132.

Efetuada uma análise à Figura 78, o consumo médio de energia de um compressor VSD é muito inferior a um de carga/vazio. Deste modo, a utilização do compressor VSD é totalmente justificada, traduzindo-se numa poupança energética anual considerável, como perceptível pela Tabela 47 (dados referentes a semanas distintas de abril de 2019).

Tabela 47 - Comparação dos consumos energéticos médios de ambos os compressores.

Potência Média Horária	GA 132	GA 132 VSD
Semanal (kW)	130,1	96,6
Dias úteis (kW)	134,5	102,3
Fim de semana (kW)	119,0	82,9
Máxima (kW)	157,2	147,2
Mínima (kW)	85,6	48,0
Consumo		
Anual (kWh)	1.032.504	769.243
Diferença (kWh)	263.261	

Se o compressor GA 132 VSD estivesse em funcionamento todo o ano, apresentaria um consumo de energia de 263 MWh a menos quando comparado com o compressor carga/vazio, o que é sensivelmente 34 % do consumo total de energia do compressor VSD.

7.3.5 Substituição do Secador de Ar Comprimido por Refrigeração

Quando o ar é comprimido, o vapor de água e a concentração de partículas aumentam drasticamente. Um secador de ar comprimido serve, essencialmente, para proteger os sistemas e processos, através da diminuição da humidade existente no ar comprimido [68].

Deste modo, é necessária a existência de um sistema eficiente para a remoção de água do ar comprimido, através da otimização dos equipamentos já existentes ou pela aquisição de novos equipamento após a realização de um breve estudo. Primeiramente foi efetuado o estudo do consumo energético do secador de ar comprimido existente ao longo de uma semana. Na Figura 79 está representado o perfil de consumo para dois dias distintos da semana, obtidos através de um analisador de energia.

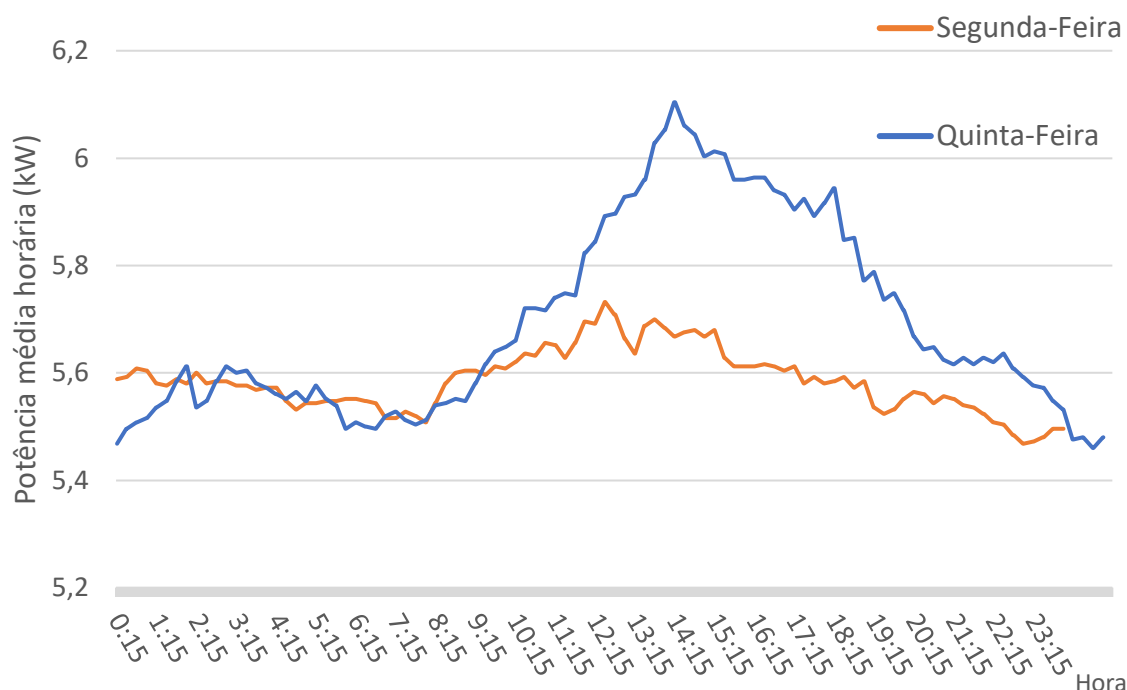


Figura 79 – Diagrama de carga do secador de ar comprimido em dois dias da semana.

O perfil de carga de segunda-feira é praticamente uniforme. Por sua vez, o perfil de quinta-feira já apresenta um pico de consumo, apresentando um consumo médio horário de energia superior a 6 kWh nesse período. O consumo médio horário para segunda-feira foi de 5,59 kWh e para quinta-feira de 5,70 kWh.

Já a potência média horária ao longo da semana de medição foi de 5,62 kW. Na Tabela 48 estão apresentadas as potências médias horárias do secador de ar comprimido para o período em estudo.

Tabela 48 – Potência média horária do secador de ar comprimido.

Média da potência horária	kW
Segunda-feira	5,59
Quinta-feira	5,70
Semanal	5,62
Máxima	6,12
Mínima	5,34

Através do valor da potência média horária é possível estimar a percentagem de carga à qual o secador de ar comprimido opera. Com os dados da Tabela 43, nomeadamente os da potência nominal, obtém-se uma percentagem de carga de 80,9 %, o que significa que não está a secar o caudal máximo de ar comprimido possível.

Os secadores de ar comprimido por refrigeração FD, da *Atlas Copco*, fornecem o ar seco e limpo, necessário para prolongar a vida útil dos equipamentos e garantir a qualidade do produto final. Atualmente existem três tecnologias distintas de secadores de ar comprimido por refrigeração (FD) baseados na tecnologia de expansão direta. A expansão direta refere-se ao processo de evaporação do fluido refrigerante, o qual absorve (para promover a mudança de estado físico) a energia contida no fluxo de ar comprimido que passa pelo equipamento promovendo o seu arrefecimento [68]:

- Sem Saver Cycle Control (não cíclico): adequado para pontos de orvalho estáveis e para aplicações de carga total;
- Com Saver Cycle Control (cíclico): adequado para caudais variáveis. A tecnologia *Saver Cycle* reduz o consumo de energia dos secadores de refrigeração integrados com ventilador nas aplicações de pouca carga. Com um sensor de temperatura ambiente para monitorizar o ponto de orvalho necessário, o controlador arranca e para o secador e o ventilador, minimizando a utilização de energia e protegendo o sistema de ar comprimido contra a corrosão;
- Secadores de velocidade variável (VSD): adequados para caudais variáveis. Os secadores VSD combinam a energia consumida pelo secador de ar comprimido atual utilizado, o que garante uma maior poupança de energia bem como um ponto de orvalho estável.

As últimas duas tecnologias descritas anteriormente resultam em mais economia de energia, dependendo do perfil de consumo de ar comprimido. Assim, o estudo para a substituição do secador abordará um secador de cada uma das tecnologias.

Do catálogo de secadores de ar comprimido por refrigeração da *Atlas Copco* [68], foram selecionados dois secadores semelhantes ao existente (foi tido em conta o aumento da procura de ar comprimido face à ampliação da empresa):

Tabela 49 - Especificações técnicas dos secadores de ar comprimido, adaptado de [68].

Modelo	FD 610 <i>Saver Cycle Control</i>	FD 760 VSD
Potência (kW)	4,8	5,3
Perda de carga (bar)	0,17	0,17
$P_{\text{máx}}$ ar comprimido (bar)	14	14
$T_{\text{máx}}$ ar comprimido (°C)	50	50
$T_{\text{máx}}$ ambiente (°C)	40	40
T_{min} ambiente (°C)	0	0
Caudal de entrada com T_{dp} de 3 °C (L/s)	610	760
Refrigerante	R410A	R410A

Com o fator de carga do secador de ar comprimido atual, percebe-se que este não está à sua capacidade máxima, existindo potencial para melhorar. Após análise da tabela anterior, e considerando o secador FD 610, o potencial de redução de energia é elevado já que este, à potência nominal de 4,8 kW, permite tratar um caudal de entrada de 610 L/s. Como o atual caudal de ar para secar é inferior, e tendo este secador a tecnologia de *Saver Cycle Control*, a potência consumida pelo secador seria inferior à potência nominal.

Para efetuar o estudo prático foi adotada uma consideração para cada secador: o secador FD 610 trabalharia a 80 % da carga e o secador FD 760 VSD a 70 %. Esta seleção de percentagens de carga está relacionada com a percentagem de carga do atual secador de ar comprimido, pois este necessita de uma maior potência para refrigerar um caudal de ar inferior quando comparado com os dois secadores escolhidos. Como estes apresentam potências inferiores para refrigerar um caudal de ar superior, além de possuírem tecnologia mais eficiente no controlo do consumo de energia, foram considerados os fatores de carga referidos anteriormente.

Uma mudança para o secador FD 610 traria uma redução estimada do consumo anual de energia de 31,6 % quando comparado com o atual secador.

Por sua vez, uma mudança para o secador FD 760 VSD permitiria uma poupança de cerca 34,0 % do consumo anual de energia quando comparado com o secador atual.

A mudança para um destes secadores traria outro benefício além da redução do consumo de energia: o fluido refrigerante. O refrigerante usado no secador existente é o R404A que apresenta um potencial nulo de destruição da camada de ozono e um GWP de 3922 (Global Warming Potential a 100 anos: medida de como uma determinada quantidade de gás contribui para o aquecimento global), classificado como elevado. A mudança para um novo secador significaria a mudança do fluido refrigerante, para o R410A, que além de destruição nula da camada de ozono apresenta um GWP de 2083 sendo classificado como médio. Assim, o impacto ambiental do novo fluido refrigerante seria menor, contribuindo para um ambiente mais sustentável [69].

Contudo, um fator negativo com a mudança do secador seria a redução da temperatura máxima de admissão do ar comprimido e da temperatura máxima ambiente, em 5 °C, para os 50 °C e os 40 °C, respetivamente.

8. Conclusões

Com a realização deste estágio, e partindo dos objetivos principais enunciados, pretendeu-se efetuar o estudo de medidas de melhoria da eficiência energética aplicáveis à *Costa Verde*, com a finalidade de reduzir o consumo específico de energia através do seu uso mais eficiente e racional.

Em relação ao secador do forno de chacota, foi realizado um levantamento de todos os fluxos mássicos e energéticos que intervêm no sistema, para cada caso de estudo, para realização de um balanço mássico e energético, com o objetivo de avaliar a intervenção realizada com a instalação da nova conduta de ar quente. Com esta nova conduta de ar quente, é projetada uma redução do consumo de gás natural no secador em 46,6 % em 2019, face a 2018, devido à cessação do uso de gás natural. Para 2020 é expectável que o consumo de gás natural no secador do forno de chacota seja nulo pela não utilização de gás natural.

No sistema de despoeiramento, sendo este um sistema com diversos equipamentos mecânicos, foi adotada a estratégia de substituir os equipamentos atuais. A substituição dos atuais motores elétricos de classe energética IE1 por motores de classe energética IE3 permitiria uma redução do consumo de energia no sistema do despoeiramento estimada em 3 %. Por sua vez, a alteração da depressão imposta de 11 mbar para uma depressão combinada de 11 e 17 mbar, dependendo do período de funcionamento, traduzir-se-ia num aumento do consumo de energia de cerca de 17,0 % comparativamente à depressão de 11 mbar, refletindo-se ainda no aumento do conforto e redução do risco para a saúde dos colaboradores com diminuição de pó cerâmico nas naves industriais. Com a substituição dos motores para classe energética IE3, este aumento seria próximo dos 14,0 %, enquanto para uma classe IE4 seria de 12,0 %. A substituição dos motores, dependendo do caso analisado, apresentaria um payback máximo estimado de 3,1 anos para um motor de classe IE3, e de 4 anos para um motor de classe IE4.

Ainda no despoeiramento, a substituição do ventilador atual por um ventilador de pás curvadas para trás reduziria o consumo de energia do sistema de despoeiramento em cerca de 4 %, enquanto a substituição conjunta do motor e ventilador significaria uma redução calculada de 7 % do consumo de energia para um motor de classe IE3, e de 8 % para um motor de classe IE4. A alteração do sistema de transmissão de energia motor-ventilador atual, do tipo correia trapezoidal, para acoplamento direto, apresenta um

potencial de economia de 5,3 %, e para transmissão indireta por correia dentada de 4,3 % face ao atual consumo energético do sistema de despoeiramento.

O sistema de ar comprimido da *Costa Verde* apresenta um compressor principal de velocidade variável, permitindo uma economia anual de energia superior a 30 % face ao compressor carga/vazio de reserva. Foi efetuado o estudo para estimar o caudal médio de ar comprimido produzido pelo compressor GA 132 VSD, tendo sido obtido o valor de 15,1 m³/min. Foram verificados os elevados custos energéticos associados à existência de fugas de ar comprimido no SAC realçando, por exemplo, o custo estimado que uma fuga de 1 mm apresenta anualmente: 394 €. O *upgrade* da tecnologia associada ao secador de ar comprimido por refrigeração seria uma medida importante a adotar, pois permitiria uma redução do consumo anual de energia do SAC superior a 30 % comparativamente ao atual secador.

O conjunto de objetivos apresentados representou 8,27 % do consumo total de energia em 2018. Se as medidas: não utilização de gás natural no secador do forno de chacota, substituição dos motores e dos ventiladores do sistema de despoeiramento, redução de fugas de ar comprimido em 10 % e alteração do secador de ar comprimido por refrigeração para o FD 610 fossem aplicadas, o consumo total de energia seria reduzido em 1,72 %, passando para 6,55 % do consumo total de energia da *Costa Verde*. Trata-se de um valor baixo, contudo uma redução de 1,72 % representaria menos 20 % no consumo dos sistemas analisados.

Em suma, o programa *Galp 21* é uma excelente oportunidade para os estudantes universitários terem uma primeira experiência de inserção nas empresas, permitindo adquirirem uma vasta gama de conhecimentos e ferramentas, desde o conhecimento de processos industriais até ao importante trabalho em equipa e multidisciplinar que é necessário numa empresa. Com este programa, as empresas abordam uma temática muitas vezes descurada, permitindo investir na eficiência energética através da racionalização e monitorização dos consumos de energia. Tal permite uma redução da fatura financeira, além da ajuda ao meio ambiente com o menor uso de energia.

8.1 Propostas de Trabalhos Futuros

No seguimento deste trabalho seria importante realizar o estudo e desenho de toda a rede de ar comprimido da *Costa Verde*, já que não existe uma planta representativa da rede. Com isto, seria possível corrigir eventuais erros de construção da rede, identificar as tubagens obsoletas se estas existissem, e instalar válvulas de seccionamento se

necessário. Com a rede projetada, e atendendo às pressões requeridas pelos equipamentos, a instalação de reservatórios junto aos equipamentos que mais ar comprimido consomem poderia também ser estudada.

Com o intuito de ser calculado e monitorizado o consumo específico de ar comprimido, seria importante a instalação de um caudalímetro à saída do compressor para a real monitorização e acompanhamento do consumo nas naves industriais.

O fecho total das laterais do secador do forno de chacota de forma a reduzir ainda mais as perdas de calor, seria um estudo interessante com o intuito de avaliar uma potencial melhoria da eficiência energética e do processo de secagem.

Existe também a possibilidade de aplicar variadores de velocidade em motores elétricos com potência nominal superior a 22 kW, por exemplo nos motores dos tanques de homogeneização na preparação de pastas, especialmente de classes energéticas IE1 e IE2, e verificar a possível redução do consumo de energia elétrica.

9. Referências

- [1] **União da Energia para a Europa.** Conselho Europeu. Disponível em: <<https://www.consilium.europa.eu/pt/policies/energy-union/>>
- [2] **Energia e clima: produção e consumo de energia.** Agência Portuguesa do Ambiente, 7 de fevereiro de 2019. Disponível em: <<https://rea.apambiente.pt/content/ultimaedicao>>
- [3] **Energy Outlook 2040.** BP, fevereiro de 2019.
- [4] **Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia.** Disponível em: <<http://sgcie.publico.adene.pt>>.
- [5] **Decreto-Lei n.º 68-A/2015.** 30 de abril de 2015.
- [6] **Consumo de energia primária.** PORDATA, 17 de julho de 2018. Disponível em: <<https://www.pordata.pt/Europa/Consumo+de+energia+prim%C3%A1ria-3399>>
- [7] **Plano Nacional Energia e Clima.** República Portuguesa, 28 de janeiro de 2019.
- [8] **cerâmica** in Artigos de apoio Infopédia. Porto: Porto Editora. Disponível em: <[https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$ceramica](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$ceramica)>.
- [9] **Um Novo Olhar Sobre a Cerâmica Portuguesa.** Vida Económica, nº1761 de 23 de novembro de 2018.
- [10] **Portugal global,** aicep Portugal Global, nº98 de maio 2017.
- [11] **Capacitação da indústria da Cerâmica Portuguesa: Um cluster, uma estratégia, mercados prioritários.** pwc, novembro de 2016.
- [12] **Comércio Internacional de produtos cerâmicos: ano de 2017.** APICER, 9 de fevereiro de 2018.
- [13] **Porcelanas Costa Verde.** Disponível em: <<https://costa-verde.com>>.
- [14] **Porcelanas Costa Verde investe sete milhões e cria mais 90 empregos,** Jornal de negócios, 11 de outubro de 2018. Disponível em: <<https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/industria/detalhe/porcelanas-costa-verde-investe-nove-milhoes-e-cria-mais-90-empregos>>.
- [15] **Costa Verde inaugura nova central fotovoltaica,** Litoral Magazine, 4 de dezembro de 2017. Disponível em: <<https://litoralmagazine.com/costa-verde-inaugura-nova-central-fotovoltaica/>>
- [16] **PE explica a importância e benefícios da Economia Circular.** 11 de abril de 2018. Disponível em: <<https://www.portugal2020.pt/Portal2020/pe-explica-a-importancia-e-beneficios-da-economia-circular>>.
- [17] **Economia Circular.** Disponível em: <<http://eco.nomia.pt/pt/economia-circular>>.
- [18] **Resolução do Conselho de Ministros n.º 190-A/2017.** 11 de dezembro de 2017.

- [19] **Economia Circular na Indústria Cerâmica: Proposta de classificação do resíduo “caco cozido” como subproduto.** Simões, A.; Coimbra, 2017.
- [20] **A economia circular na indústria cerâmica.** Almeida, M. *et al*; CCTV.
- [21] **Costa Verde, Minimum.** Disponível em: <<http://eco.nomia.pt/pt/exemplos/costa-verde>>
- [22] **Processos de cozedura em cerâmica.** Canotilho, M.; Instituto Politécnico de Bragança, 2003.
- [23] **Otimização energética dos fornos de uma indústria do sector cerâmico.** Cruz, J.; ISEP, julho de 2009.
- [24] **Análise numérica e experimental de um secador contínuo tipo túnel utilizado na indústria de cerâmica vermelha.** Lehmkuhl, W.; Universidade Federal de Santa Catarina, dezembro de 2004.
- [25] **Secagem de materiais cerâmicos.** Oliveira, B. *et al*; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, junho de 2010.
- [26] **Apontamentos da disciplina de Termodinâmica Aplicada.** Universidade de Aveiro.
- [27] **Apontamentos da disciplina de Termodinâmica Macroscópica.** Universidade de Aveiro.
- [28] **Tubo de Pitot Estático.** Air Flow Brasil. Disponível em: <<http://www.airflowbrasil.com.br/velocidadedoar/027.htm>>
- [29] **Turbulent Flow.** Henryk Kudela, Wroclaw University of Science and Technology: Division of Numerical Flow Modeling.
- [30] **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** Incropera, F. *et al*; 7ª edição, John Wiley & Sons, 2011.
- [31] **Noções de Ventilação Industrial.** Oliveira, Jaime.
- [32] **Ventiladores e Exaustores: Guia Básico.** PROCEL Indústria, 2009.
- [33] **Ventilação Local Exaustora em Galvanoplastia.** Fundacentro, 2002.
- [34] **Implementação de um sistema de despoeiramento para otimização da produção e minimização de impacto ambiental.** Santos, E., Rocha, P. *et al*.
- [35] **Análise da operação de sistemas de ventilação industrial visando à eficiência energética.** Moreira, A.; Universidade Federal do Ceará, dezembro de 2006.
- [36] **Fans & Blowers: Energy Efficiency Reference Guide.** BC Hydro Power Smart, 2008.
- [37] **Fan Types.** Ventilation System. Disponível em: <<https://ventilation-system.com/fan-types>>
- [38] **Construção de Ventiladores Centrífugos para Uso Agrícola.** Silva, J. *et al*. Brasília, maio de 2013.

- [39] **Eficiência Energética em Equipamentos de Força-Motriz.** Carvalho, José; Instituto Superior de Engenharia do Porto
- [40] **Regulamentações Globais de Eficiência para Motores Elétricos de Baixa Tensão.** WEG, outubro de 2017.
- [41] **Balanço Energético da Operação de uma Caldeira a Biomassa.** Vieira, L.; Universidade de Aveiro, 2014.
- [42] **Premium Efficiency Motor Selection And Application Guide: A Guidebook for Industry.** U.S. Department of Energy, fevereiro de 2014.
- [43] **Electric Motor Efficiency under Variable Frequencies and Loads,** Burt, C. *et al*; abril de 2008
- [44] **Elementos de Máquinas 2.** Escola SENAI, Departamento Regional de São Paulo. Telecurso 2000.
- [45] **Acoplamentos: Entenda e escolha hoje o modelo ideal para você!** Acoplast Brasil, setembro de 2018. Disponível em: <<https://www.acoplastbrasil.com.br/o-que-sao-acoplamentos/>>
- [46] **Mechanical Power Transmission Fundamentals.** Tata, R.; 2012.
- [47] **Noções Básicas de Elementos de Máquinas – Mecânica.** SENAI - ES, 1996.
- [48] **T02 - Transmissão por Correias.** Flores, P. *et al*. Universidade do Minho, janeiro de 2017.
- [49] **T03 - Transmissão por Correntes.** Flores, P. *et al*. Universidade do Minho, janeiro de 2017.
- [50] **Análise de Eficiência dos Sistemas de Ar Comprimido em Unidades Industriais.** Oliveira, P.; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, fevereiro de 2018.
- [51] **Eficiência Energética em Ar Comprimido.** Atlas Copco. Costa, A.; 31 de outubro de 2012;
- [52] **Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido.** Freiras, A.; Universidade de Coimbra, setembro de 2017.
- [53] **Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido.** Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2005.
- [54] **Dimensionamento de Redes de Ar Comprimido.** Parker Hannifin Corporation, setembro de 2006.
- [55] **Despacho n.º 1859/2003 (2.ª série).** 30 de janeiro de 2003
- [56] **Atlas Copco Compressed Air Manual.** Atlas Copco, 8ª edição, Bélgica, 2015.
- [57] **Tratamento do Ar Comprimido.** Otavio, L.; 2016.

- [58] **Introduction to ISSO Air Quality Standards.** Parker Hannifin Corporation, abril de 2010.
- [59] **Manual de Ar Comprimido.** Metalplan Airpower, 6ª edição, 2017.
- [60] **Rede de Ar Comprimido.** Otavio, L.; 2016.
- [61] **Filtros de ar comprimido série DD/DDp/PD/QD.** Atlas Copco.
- [62] **Manual de Instruções GA 132 VSD.** Atlas Copco, fevereiro de 2016.
- [63] **Data Sheets.** CAGI - Compressed Air & Gas Institute. Disponível em <<https://www.cagi.org/performance-verification/data-sheets.aspx>>
- [64] **Conversion of scfm to acfm.** CAGI - Compressed Air & Gas Institute. Disponível em <<https://www.cagi.org/working-with-compressed-air/conversion-scfm-acfm.aspx>>
- [65] **Atlas Copco Air Dryers, FD series – 50-60 Hz, Refrigeration air dryers.** Atlas Copco.
- [66] **Conhecimentos Básicos do Ar Comprimido.** Biaut: Automação Industrial, agosto de 2017.
- [67] **Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido.** ADENE - Agência para a Energia, junho de 2016.
- [68] **Refrigerant air dryers.** Atlas Copco, 2017.
- [69] **Refrigerants Environmental Data: Ozone Depletion and Global Warming Potential.** Linde Gases AG.

Anexo 1

Fatores de conversão e constantes com base no Despacho n.º 17313/2008:

- $\rho_{\text{gás}} = 0,8404 \text{ kg/Nm}^3$
- $\text{PCI}_{\text{gás}} = 4,51 \times 10^7 \text{ J/kg} = 1,077 \text{ tep/ton}$
- $C_{p_{\text{gás}}} = 2020 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
- $1 \text{ tep} = 41.868 \text{ MJ}$
- $1 \text{ kWh} = 215 \times 10^{-6} \text{ tep}$

Áreas importantes para os cálculos:

- $A_{\text{conduta_ar_admissão}} = 0,2437 \text{ m}^2$
- $A_{\text{conduta_ar_exaustão}} = 0,1940 \text{ m}^2$
- $A_{\text{conduta_ar_ida_chacota}} = 0,0119 \text{ m}^2$
- $A_{\text{conduta_ar_nova_entrada_quente}} = 0,2288 \text{ m}^2$
- $A_{\text{paredes_laterais_secador}} = 1,415 \text{ m}^2$
- $A_{\text{teto_secador}} = 3,597 \text{ m}^2$

Caso 1: Só Queimador**Tabela 50 – Constantes para o caso 1.**

Corrente	Grandeza	Valor	Unidades
Ar de admissão	C_p	1011	J/(kg . K)
	ρ	0,8977	kg/m ³
Ar de exaustão	C_p	1007	J/(kg . K)
	ρ	1,044	kg/m ³
Ar de chacota	C_p	1007	J/(kg . K)
	ρ	1,110	kg/m ³
Vagonas	C_p	661,4	J/(kg . K)
Louça	C_p	1000	J/(kg . K)
Mobília	C_p	830	J/(kg . K)

A temperatura da louça e da mobília foi medida à saída do secador em 8 pontos distintos: 4 no tabuleiro superior da vagona e 4 no tabuleiro inferior.

Tabela 51 - Temperaturas medidas à saída do secador para o caso 1.

	Tabuleiro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Louça (°C)	Superior	33,8	43,4	44,1	43,9
	Inferior	33,1	35,9	40,4	41,4
Mobília (°C)	Superior	32,9	38,9	38,3	41,2
	Inferior	29,7	36,0	36,5	40,9

O peso médio das vagonas, da mobília refratária e da louça está apresentado na Tabela 52:

Tabela 52 – Peso médio na entrada e saída do secador, por hora, para o caso 1.

	Entrada do secador	Saída do secador
Louça (kg)	763,16	752,34
Mobília Refratária (kg)	731,90	731,90
Vagona (kg)	1040,00	1040,00

Tabela 53 - Perdas por convecção pela parede direita para o caso 1.

Parede do lado do Forno de Chacota									
$T_{\text{filme}} \text{ (K)}$	$\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^2\text{/s);}$	$\nu \text{ (m}^2\text{/s);}$	Ra_L	Pr	\overline{Nu}_L	$K \text{ (W/(m . K))}$	$\bar{h} \text{ (W/(m}^2\text{. K))}$	$\dot{Q} \text{ (kJ/s)}$
304,4	0,00166	2,230E-05	1,623E-05	1,361E+08	0,7278	67,175	0,0260	2,043	0,0140
305,7	0,00165	2,249E-05	1,636E-05	1,707E+08	0,7274	71,902	0,0261	2,195	0,0193
305,7	0,00165	2,249E-05	1,636E-05	1,693E+08	0,7274	71,728	0,0261	2,190	0,0191
305,3	0,00165	2,243E-05	1,632E-05	1,593E+08	0,7275	70,434	0,0261	2,147	0,0175
305,5	0,00165	2,245E-05	1,633E-05	1,644E+08	0,7274	71,103	0,0261	2,169	0,0183
305,7	0,00165	2,249E-05	1,636E-05	1,693E+08	0,7274	71,728	0,0261	2,190	0,0191
306,0	0,00165	2,254E-05	1,639E-05	1,782E+08	0,7273	72,841	0,0261	2,226	0,0205
306,3	0,00165	2,256E-05	1,641E-05	1,845E+08	0,7272	73,612	0,0261	2,250	0,0215
306,8	0,00165	2,263E-05	1,646E-05	1,969E+08	0,7271	75,060	0,0262	2,298	0,0236
305,0	0,00165	2,240E-05	1,630E-05	1,528E+08	0,7276	69,559	0,0261	2,119	0,0165
304,5	0,00166	2,230E-05	1,623E-05	1,388E+08	0,7278	67,584	0,0260	2,055	0,0144
304,3	0,00166	2,230E-05	1,623E-05	1,347E+08	0,7278	66,968	0,0260	2,036	0,0138
304,6	0,00166	2,234E-05	1,626E-05	1,425E+08	0,7277	68,112	0,0260	2,073	0,0150
304,5	0,00166	2,234E-05	1,626E-05	1,397E+08	0,7277	67,712	0,0260	2,061	0,0146
304,4	0,00166	2,230E-05	1,623E-05	1,361E+08	0,7278	67,175	0,0260	2,043	0,0140
305,0	0,00165	2,240E-05	1,630E-05	1,528E+08	0,7276	69,559	0,0261	2,119	0,0165
303,5	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,135E+08	0,7280	63,622	0,0259	1,930	0,0109
302,8	0,00166	2,208E-05	1,608E-05	9,319E+07	0,7282	59,998	0,0259	1,816	0,0084
302,1	0,00166	2,199E-05	1,602E-05	7,381E+07	0,7284	55,983	0,0258	1,691	0,0061
302,0	0,00166	2,199E-05	1,602E-05	7,237E+07	0,7284	55,657	0,0258	1,681	0,0059
301,9	0,00166	2,199E-05	1,602E-05	6,805E+07	0,7284	54,650	0,0258	1,651	0,0055
Total									0,3142

Tabela 54 - Perdas por convecção pela parede esquerda para o caso 1.

Parede do lado da Contramoldagem									
$T_{\text{filme}} \text{ (K)}$	$\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^2\text{/s);}$	$\nu \text{ (m}^2\text{/s);}$	Ra_L	Pr	\overline{Nu}_L	$K \text{ (W/(m} \cdot \text{K))}$	$\bar{h} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{K))}$	$\dot{Q} \text{ (kJ/s)}$
301,0	0,00167	2,184E-05	1,591E-05	4,260E+07	0,7287	47,605	0,0257	1,434	0,0029
302,0	0,00166	2,199E-05	1,602E-05	7,237E+07	0,7284	55,657	0,0258	1,681	0,0059
304,3	0,00166	2,230E-05	1,623E-05	1,333E+08	0,7278	66,760	0,0260	2,030	0,0136
305,4	0,00165	2,245E-05	1,633E-05	1,617E+08	0,7274	70,745	0,0261	2,158	0,0179
305,3	0,00165	2,245E-05	1,633E-05	1,603E+08	0,7274	70,564	0,0261	2,152	0,0177
305,0	0,00165	2,240E-05	1,630E-05	1,515E+08	0,7276	69,370	0,0261	2,114	0,0163
304,3	0,00166	2,230E-05	1,623E-05	1,347E+08	0,7278	66,968	0,0260	2,036	0,0138
304,9	0,00165	2,237E-05	1,628E-05	1,491E+08	0,7276	69,039	0,0260	2,102	0,0159
303,8	0,00166	2,222E-05	1,617E-05	1,202E+08	0,7279	64,731	0,0260	1,965	0,0118
304,0	0,00166	2,225E-05	1,619E-05	1,255E+08	0,7279	65,573	0,0260	1,992	0,0125
304,3	0,00166	2,230E-05	1,623E-05	1,333E+08	0,7278	66,760	0,0260	2,030	0,0136
304,1	0,00166	2,227E-05	1,621E-05	1,294E+08	0,7278	66,174	0,0260	2,011	0,0131
303,5	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,120E+08	0,7280	63,385	0,0259	1,923	0,0107
303,3	0,00166	2,216E-05	1,614E-05	1,081E+08	0,7280	62,707	0,0259	1,901	0,0102
304,1	0,00166	2,227E-05	1,621E-05	1,294E+08	0,7278	66,174	0,0260	2,011	0,0131
303,6	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,149E+08	0,7280	63,857	0,0259	1,937	0,0111
304,5	0,00166	2,234E-05	1,626E-05	1,397E+08	0,7277	67,712	0,0260	2,061	0,0146
303,9	0,00166	2,225E-05	1,619E-05	1,227E+08	0,7279	65,132	0,0260	1,978	0,0122
303,4	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,106E+08	0,7280	63,146	0,0259	1,916	0,0106
301,3	0,00166	2,189E-05	1,595E-05	5,260E+07	0,7286	50,650	0,0258	1,527	0,0039
300,6	0,00167	2,179E-05	1,588E-05	3,102E+07	0,7288	43,386	0,0257	1,305	0,0019
Total									0,2435

Tabela 55 - Perdas por convecção pelo teto para o caso 1.

Teto do Secador									
$T_{\text{filme}} \text{ (K)}$	$\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^2\text{/s);}$	$\nu \text{ (m}^2\text{/s);}$	Ra_L	Pr	\overline{Nu}_L	$K \text{ (W/(m} \cdot \text{K))}$	$\bar{h} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{K))}$	$\dot{Q} \text{ (kJ/s)}$
307,8	0,00165	2,277E-05	1,655E-05	3,681E+07	0,7268	49,898	0,0263	1,532	0,0179
311,3	0,00164	2,325E-05	1,688E-05	5,005E+07	0,7259	55,279	0,0265	1,714	0,0285
309,3	0,00164	2,298E-05	1,669E-05	4,264E+07	0,7264	52,405	0,0264	1,616	0,0223
309,3	0,00164	2,298E-05	1,669E-05	4,264E+07	0,7264	52,405	0,0264	1,616	0,0223
312,8	0,00163	2,346E-05	1,702E-05	5,534E+07	0,7255	57,162	0,0266	1,780	0,0334
309,3	0,00164	2,298E-05	1,669E-05	4,264E+07	0,7264	52,405	0,0264	1,616	0,0223
309,3	0,00164	2,298E-05	1,669E-05	4,264E+07	0,7264	52,405	0,0264	1,616	0,0223
310,8	0,00164	2,318E-05	1,683E-05	4,824E+07	0,7260	54,603	0,0265	1,691	0,0269
310,3	0,00164	2,312E-05	1,679E-05	4,640E+07	0,7262	53,900	0,0264	1,666	0,0253
307,8	0,00165	2,277E-05	1,655E-05	3,681E+07	0,7268	49,898	0,0263	1,532	0,0179
310,8	0,00164	2,318E-05	1,683E-05	4,824E+07	0,7260	54,603	0,0265	1,691	0,0269
308,3	0,00165	2,284E-05	1,660E-05	3,878E+07	0,7267	50,773	0,0263	1,561	0,0193
307,3	0,00165	2,270E-05	1,650E-05	3,481E+07	0,7269	48,978	0,0262	1,502	0,0165
310,8	0,00164	2,318E-05	1,683E-05	4,824E+07	0,7260	54,603	0,0265	1,691	0,0269
308,8	0,00164	2,291E-05	1,664E-05	4,073E+07	0,7265	51,607	0,0263	1,589	0,0208
307,3	0,00165	2,270E-05	1,650E-05	3,481E+07	0,7269	48,978	0,0262	1,502	0,0165
310,8	0,00164	2,318E-05	1,683E-05	4,824E+07	0,7260	54,603	0,0265	1,691	0,0269
306,3	0,00165	2,256E-05	1,641E-05	3,073E+07	0,7272	46,984	0,0261	1,436	0,0137
304,3	0,00166	2,229E-05	1,622E-05	2,222E+07	0,7278	42,171	0,0260	1,282	0,0086
305,8	0,00165	2,249E-05	1,636E-05	2,865E+07	0,7274	45,897	0,0261	1,401	0,0124
303,3	0,00166	2,215E-05	1,613E-05	1,778E+07	0,7281	39,153	0,0259	1,187	0,0063
Total									0,4339

Tabela 56 – Perdas por radiação para o caso 1.

Parede do lado do Forno de Chacota			Parede do lado da Contramoldagem			Teto do Secador		
T (°C)	T _{filme} (K)	Q̇ (kJ/s)	T (°C)	T _{filme} (K)	Q̇ (kJ/s)	T (°C)	T _{filme} (K)	Q̇ (kJ/s)
36,2	309,2	-0,126	29,4	302,4	0,019	43	316	0,384
38,9	311,9	-0,103	31,5	304,5	0,036	50	323	0,552
38,8	311,8	-0,103	36	309,0	0,073	46	319	0,455
38	311,0	-0,110	38,2	311,2	0,092	46	319	0,455
38,4	311,4	-0,107	38,1	311,1	0,091	53	326	0,628
38,8	311,8	-0,103	37,4	310,4	0,085	46	319	0,455
39,5	312,5	-0,097	36,1	309,1	0,074	46	319	0,455
40	313,0	-0,093	37,2	310,2	0,084	49	322	0,527
41	314,0	-0,084	35	308,0	0,065	48	321	0,503
37,5	310,5	-0,115	35,4	308,4	0,068	43	316	0,384
36,4	309,4	-0,124	36	309,0	0,073	49	322	0,527
36,1	309,1	-0,127	35,7	308,7	0,071	44	317	0,407
36,7	309,7	-0,122	34,4	307,4	0,060	42	315	0,361
36,5	309,5	-0,123	34,1	307,1	0,057	49	322	0,527
36,2	309,2	-0,126	35,7	308,7	0,071	45	318	0,431
37,5	310,5	-0,115	34,6	307,6	0,062	42	315	0,361
34,5	307,5	-0,140	36,5	309,5	0,078	49	322	0,527
33	306,0	-0,153	35,2	308,2	0,067	40	313	0,315
31,6	304,6	-0,164	34,3	307,3	0,059	36	309	0,227
31,5	304,5	-0,165	30,1	303,1	0,025	39	312	0,293
31,2	304,2	-0,168	28,6	301,6	0,013	34	307	0,184

Caso 2: Queimador + Nova Conduta de Ar Quente**Tabela 57 – Constantes para o caso 2.**

Corrente	Grandeza	Valor	Unidades
Ar de admissão	C_p	1012	J/(kg . K)
	ρ	0,8760	kg/m ³
Ar quente da nova conduta	C_p	1018,1	J/(kg . K)
	ρ	0,7896	kg/m ³
Ar de exaustão	C_p	1008	J/(kg . K)
	ρ	0,9801	kg/m ³
Ar de chacota	C_p	1007	J/(kg . K)
	ρ	1,0722	kg/m ³
Vagonas	C_p	661,4	J/(kg . K)
Louça	C_p	1000	J/(kg . K)
Mobília	C_p	830	J/(kg . K)

A temperatura da louça e da mobília foi medida à saída do secador em 8 pontos distintos: 4 no tabuleiro superior da vagona e 4 no tabuleiro inferior.

Tabela 58 - Temperaturas medidas para o caso 2.

	Tabuleiro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Louça (°C)	Superior	40,3	43,5	45,9	46,2
	Inferior	38,2	41,8	42,8	43,6
Mobília (°C)	Superior	37,7	40,8	44,0	43,6
	Inferior	36,3	36,9	39,7	41,9

O peso médio das vagonas, da mobília refratária e da louça está apresentado na Tabela 59:

Tabela 59 – Peso médio na entrada e saída do secador, por hora, para o caso 2.

	Entrada do secador	Saída do secador
Louça (kg)	712,95	701,55
Mobília Refratária (kg)	731,90	731,90
Vagona (kg)	1040,00	1040,00

Tabela 60 - Perdas por convecção pela parede direita para o caso 2.

Parede do lado do Forno de Chacota									
$T_{\text{filme}} \text{ (K)}$	$\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^2\text{/s);}$	$\nu \text{ (m}^2\text{/s);}$	Ra_L	Pr	\overline{Nu}_L	$K \text{ (W/(m} \cdot \text{K))}$	$\bar{h} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{K))}$	$\dot{Q} \text{ (kJ/s)}$
305,9	0,00165	2,248E-05	1,635E-05	1,763E+08	0,7274	72,611	0,0261	2,216	0,0201
305,6	0,00165	2,244E-05	1,632E-05	1,687E+08	0,7275	71,658	0,0261	2,185	0,0189
305,8	0,00165	2,248E-05	1,635E-05	1,736E+08	0,7274	72,271	0,0261	2,206	0,0197
306,0	0,00165	2,248E-05	1,635E-05	1,791E+08	0,7274	72,947	0,0261	2,226	0,0205
306,3	0,00165	2,254E-05	1,639E-05	1,863E+08	0,7273	73,827	0,0261	2,256	0,0217
305,5	0,00165	2,244E-05	1,632E-05	1,660E+08	0,7275	71,306	0,0261	2,174	0,0185
306,8	0,00165	2,260E-05	1,644E-05	1,987E+08	0,7271	75,268	0,0262	2,303	0,0238
310,2	0,00164	2,307E-05	1,676E-05	2,770E+08	0,7262	83,213	0,0264	2,571	0,0387
308,2	0,00165	2,280E-05	1,657E-05	2,324E+08	0,7267	78,909	0,0263	2,424	0,0298
309,4	0,00164	2,296E-05	1,668E-05	2,602E+08	0,7264	81,655	0,0264	2,517	0,0353
306,3	0,00165	2,254E-05	1,639E-05	1,863E+08	0,7273	73,827	0,0261	2,256	0,0217
305,9	0,00165	2,248E-05	1,635E-05	1,750E+08	0,7274	72,442	0,0261	2,211	0,0199
307,4	0,00165	2,269E-05	1,649E-05	2,133E+08	0,7270	76,894	0,0262	2,357	0,0263
307,2	0,00165	2,266E-05	1,647E-05	2,071E+08	0,7270	76,216	0,0262	2,335	0,0253
306,9	0,00165	2,260E-05	1,644E-05	2,014E+08	0,7271	75,574	0,0262	2,312	0,0242
310,1	0,00164	2,307E-05	1,676E-05	2,745E+08	0,7262	82,980	0,0264	2,563	0,0383
307,3	0,00165	2,269E-05	1,649E-05	2,106E+08	0,7270	76,603	0,0262	2,348	0,0259
305,3	0,00165	2,240E-05	1,630E-05	1,611E+08	0,7276	70,667	0,0261	2,153	0,0177
303,8	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,219E+08	0,7280	65,004	0,0259	1,972	0,0120
303,6	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,163E+08	0,7280	64,090	0,0259	1,944	0,0113
303,7	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,177E+08	0,7280	64,322	0,0259	1,951	0,0115
Total									0,4809

Tabela 61 - Perdas por convecção pela parede esquerda para o caso 2.

Parede do lado da Contramoldagem									
$T_{\text{filme}} \text{ (K)}$	$\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^2\text{/s)}$	$\nu \text{ (m}^2\text{/s)}$	Ra_L	Pr	\overline{Nu}_L	$K \text{ (W/(m} \cdot \text{K))}$	$\bar{h} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{K))}$	$\dot{Q} \text{ (kJ/s)}$
300,0	0,00167	2,161E-05	1,576E-05	1,502E+07	0,7292	35,175	0,0256	1,054	0,0007
300,8	0,00167	2,179E-05	1,588E-05	3,839E+07	0,7288	46,174	0,0257	1,389	0,0026
302,0	0,00166	2,195E-05	1,599E-05	7,263E+07	0,7285	55,717	0,0258	1,682	0,0059
304,2	0,00166	2,225E-05	1,619E-05	1,325E+08	0,7279	66,648	0,0260	2,024	0,0135
306,6	0,00165	2,258E-05	1,642E-05	1,924E+08	0,7272	74,545	0,0261	2,280	0,0227
304,5	0,00166	2,229E-05	1,622E-05	1,390E+08	0,7278	67,609	0,0260	2,055	0,0144
303,8	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,219E+08	0,7280	65,004	0,0259	1,972	0,0120
303,6	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,149E+08	0,7280	63,857	0,0259	1,937	0,0111
303,3	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,078E+08	0,7280	62,661	0,0259	1,901	0,0102
304,3	0,00166	2,225E-05	1,619E-05	1,353E+08	0,7279	67,066	0,0260	2,037	0,0138
305,3	0,00165	2,240E-05	1,630E-05	1,611E+08	0,7276	70,667	0,0261	2,153	0,0177
304,8	0,00165	2,229E-05	1,622E-05	1,474E+08	0,7278	68,802	0,0260	2,092	0,0155
304,7	0,00166	2,229E-05	1,622E-05	1,446E+08	0,7278	68,410	0,0260	2,080	0,0152
304,8	0,00165	2,229E-05	1,622E-05	1,474E+08	0,7278	68,802	0,0260	2,092	0,0155
306,3	0,00165	2,254E-05	1,639E-05	1,863E+08	0,7273	73,827	0,0261	2,256	0,0217
305,9	0,00165	2,248E-05	1,635E-05	1,763E+08	0,7274	72,611	0,0261	2,216	0,0201
305,7	0,00165	2,244E-05	1,632E-05	1,701E+08	0,7275	71,833	0,0261	2,190	0,0191
304,7	0,00166	2,229E-05	1,622E-05	1,460E+08	0,7278	68,607	0,0260	2,086	0,0153
304,4	0,00166	2,225E-05	1,619E-05	1,381E+08	0,7279	67,479	0,0260	2,050	0,0142
302,3	0,00166	2,199E-05	1,602E-05	8,102E+07	0,7284	57,552	0,0258	1,739	0,0069
300,7	0,00167	2,179E-05	1,588E-05	3,544E+07	0,7288	45,108	0,0257	1,357	0,0023
Total									0,2705

Tabela 62 - Perdas por convecção pelo teto para o caso 2.

Teto do Secador									
$T_{\text{filme}} \text{ (K)}$	$\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^2\text{/s)}$	$\nu \text{ (m}^2\text{/s)}$	Ra_L	Pr	\overline{Nu}_L	$K \text{ (W/(m} \cdot \text{K))}$	$\bar{h} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{K))}$	$\dot{Q} \text{ (kJ/s)}$
307,8	0,00165	2,277E-05	1,655E-05	2,211E+08	0,7268	90,696	0,0263	2,785	0,0325
311,8	0,00164	2,329E-05	1,691E-05	3,120E+08	0,7258	101,737	0,0265	3,157	0,0547
310,3	0,00164	2,309E-05	1,677E-05	2,793E+08	0,7262	98,046	0,0264	3,030	0,0461
310,3	0,00164	2,309E-05	1,677E-05	2,793E+08	0,7262	98,046	0,0264	3,030	0,0461
314,3	0,00163	2,364E-05	1,714E-05	3,635E+08	0,7251	107,055	0,0267	3,345	0,0698
310,3	0,00164	2,309E-05	1,677E-05	2,793E+08	0,7262	98,046	0,0264	3,030	0,0461
309,8	0,00164	2,302E-05	1,672E-05	2,680E+08	0,7263	96,715	0,0264	2,984	0,0433
312,3	0,00163	2,336E-05	1,695E-05	3,226E+08	0,7257	102,878	0,0266	3,197	0,0577
311,3	0,00164	2,323E-05	1,686E-05	3,012E+08	0,7259	100,553	0,0265	3,116	0,0518
309,3	0,00164	2,296E-05	1,668E-05	2,564E+08	0,7264	95,290	0,0264	2,937	0,0405
311,8	0,00164	2,329E-05	1,691E-05	3,120E+08	0,7258	101,737	0,0265	3,157	0,0547
309,8	0,00164	2,302E-05	1,672E-05	2,680E+08	0,7263	96,715	0,0264	2,984	0,0433
308,8	0,00164	2,288E-05	1,663E-05	2,451E+08	0,7266	93,876	0,0263	2,889	0,0378
312,3	0,00163	2,336E-05	1,695E-05	3,226E+08	0,7257	102,878	0,0266	3,197	0,0577
310,3	0,00164	2,309E-05	1,677E-05	2,793E+08	0,7262	98,046	0,0264	3,030	0,0461
308,3	0,00165	2,281E-05	1,658E-05	2,334E+08	0,7267	92,359	0,0263	2,838	0,0351
312,8	0,00163	2,346E-05	1,702E-05	3,323E+08	0,7255	103,900	0,0266	3,235	0,0607
306,3	0,00165	2,254E-05	1,639E-05	1,850E+08	0,7273	85,467	0,0261	2,611	0,0249
304,8	0,00165	2,229E-05	1,622E-05	1,474E+08	0,7278	79,229	0,0260	2,408	0,0179
306,3	0,00165	2,254E-05	1,639E-05	1,850E+08	0,7273	85,467	0,0261	2,611	0,0249
303,3	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,064E+08	0,7280	71,081	0,0259	2,156	0,0114
Total									0,9032

Tabela 63 – Perdas por radiação para o caso 2.

Parede do lado do Forno de Chacota			Parede do lado da Contramoldagem			Teto do Secador		
T (°C)	T _{filme} (K)	Q̇ (kJ/s)	T (°C)	T _{filme} (K)	Q̇ (kJ/s)	T (°C)	T _{filme} (K)	Q̇ (kJ/s)
39,3	312,3	-0,099	27,5	300,5	0,004	43	316	0,383
38,7	311,7	-0,104	29,1	302,1	0,017	51	324	0,575
39,1	312,1	-0,101	31,5	304,5	0,036	48	321	0,501
39,5	312,5	-0,097	35,9	308,9	0,073	48	321	0,501
40,1	313,1	-0,092	40,6	313,6	0,113	56	329	0,703
38,5	311,5	-0,106	36,4	309,4	0,077	48	321	0,501
41,1	314,1	-0,083	35,1	308,1	0,066	47	320	0,477
47,8	320,8	-0,021	34,6	307,6	0,062	52	325	0,600
43,9	316,9	-0,058	34,1	307,1	0,057	50	323	0,550
46,3	319,3	-0,035	36,1	309,1	0,074	46	319	0,453
40,1	313,1	-0,092	38,1	311,1	0,091	51	324	0,575
39,2	312,2	-0,100	37	310,0	0,082	47	320	0,477
42,3	315,3	-0,072	36,8	309,8	0,080	45	318	0,430
41,8	314,8	-0,077	37	310,0	0,082	52	325	0,600
41,3	314,3	-0,081	40,1	313,1	0,109	48	321	0,501
47,6	320,6	-0,023	39,3	312,3	0,102	44	317	0,406
42,1	315,1	-0,074	38,8	311,8	0,098	53	326	0,626
38,1	311,1	-0,110	36,9	309,9	0,081	40	313	0,314
35,1	308,1	-0,135	36,3	309,3	0,076	37	310	0,248
34,7	307,7	-0,139	32,1	305,1	0,041	40	313	0,314
34,8	307,8	-0,138	28,9	301,9	0,015	34	307	0,183

Caso 3: Só Nova Conduta de Ar Quente

Tabela 64 – Constantes para o caso 3.

Corrente	Grandeza	Valor	Unidades
Ar de admissão	C_p	1012	J/(kg . K)
	ρ	0,8760	kg/m ³
Ar quente da nova conduita	C_p	1018,1	J/(kg . K)
	ρ	0,7824	kg/m ³
Ar de exaustão	C_p	1008	J/(kg . K)
	ρ	1,0342	kg/m ³
Ar de chacota	C_p	1007	J/(kg . K)
	ρ	1,0466	kg/m ³
Vagonas	C_p	661,4	J/(kg . K)
Louça	C_p	1000	J/(kg . K)
Mobília	C_p	830	J/(kg . K)

A temperatura da louça e da mobília foi medida à saída do secador em 8 pontos distintos: 4 no tabuleiro superior da vagona e 4 no tabuleiro inferior.

Tabela 65 - Temperaturas medidas para o caso 3.

	Tabuleiro	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Louça (°C)	Superior	40,1	44,9	46,8	48,3
	Inferior	39,0	42,7	42,7	43,1
Mobília (°C)	Superior	37,6	43,3	44,1	45,4
	Inferior	36,6	38,8	41,2	41,8

O peso médio das vagonas, da mobília refratária e da louça está apresentado na Tabela 66:

Tabela 66 – Peso médio na entrada e saída do secador, por hora, para o caso 3.

	Entrada do secador	Saída do secador
Louça (kg)	604,53	594,38
Mobília Refratária (kg)	731,90	731,90
Vagona (kg)	1040,00	1040,00

Tabela 67 - Perdas por convecção pela parede direita para o caso 3.

Parede do lado do Forno de Chacota									
$T_{\text{filme}} \text{ (K)}$	$\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^2\text{/s);}$	$\nu \text{ (m}^2\text{/s);}$	Ra_L	Pr	\overline{Nu}_L	$K \text{ (W/(m} \cdot \text{K))}$	$\bar{h} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{K))}$	$\dot{Q} \text{ (kJ/s)}$
302,3	0,00166	2,199E-05	1,602E-05	8,102E+07	0,7284	57,552	0,0258	1,739	0,0069
302,9	0,00166	2,208E-05	1,608E-05	9,605E+07	0,7282	60,539	0,0259	1,832	0,0087
303,2	0,00166	2,211E-05	1,610E-05	1,043E+08	0,7281	62,053	0,0259	1,879	0,0097
303,2	0,00166	2,211E-05	1,610E-05	1,058E+08	0,7281	62,304	0,0259	1,887	0,0099
304,5	0,00166	2,229E-05	1,622E-05	1,390E+08	0,7278	67,609	0,0260	2,055	0,0144
305,5	0,00165	2,243E-05	1,632E-05	1,662E+08	0,7275	71,332	0,0261	2,175	0,0185
307,5	0,00165	2,270E-05	1,650E-05	2,144E+08	0,7269	77,011	0,0262	2,361	0,0266
306,6	0,00165	2,258E-05	1,642E-05	1,938E+08	0,7272	74,702	0,0261	2,284	0,0230
306,5	0,00165	2,258E-05	1,642E-05	1,911E+08	0,7272	74,387	0,0261	2,275	0,0225
306,7	0,00165	2,258E-05	1,642E-05	1,951E+08	0,7272	74,858	0,0261	2,289	0,0232
306,2	0,00165	2,252E-05	1,638E-05	1,825E+08	0,7273	73,365	0,0261	2,241	0,0211
307,5	0,00165	2,270E-05	1,650E-05	2,157E+08	0,7269	77,155	0,0262	2,365	0,0268
308,9	0,00164	2,289E-05	1,663E-05	2,488E+08	0,7266	80,548	0,0263	2,479	0,0330
308,6	0,00164	2,285E-05	1,661E-05	2,418E+08	0,7266	79,859	0,0263	2,456	0,0316
308,2	0,00165	2,280E-05	1,657E-05	2,324E+08	0,7267	78,909	0,0263	2,424	0,0298
309,7	0,00164	2,300E-05	1,671E-05	2,658E+08	0,7264	82,176	0,0264	2,535	0,0364
306,7	0,00165	2,258E-05	1,642E-05	1,951E+08	0,7272	74,858	0,0261	2,289	0,0232
304,1	0,00166	2,223E-05	1,618E-05	1,285E+08	0,7279	66,032	0,0260	2,005	0,0129
303,8	0,00166	2,219E-05	1,616E-05	1,219E+08	0,7280	65,004	0,0259	1,972	0,0120
304,6	0,00166	2,229E-05	1,622E-05	1,432E+08	0,7278	68,212	0,0260	2,074	0,0150
304,0	0,00166	2,222E-05	1,617E-05	1,272E+08	0,7279	65,840	0,0260	1,999	0,0127
Total									0,4177

Tabela 68 - Perdas por convecção pela parede esquerda para o caso 3.

Parede do lado da Contramoldagem									
$T_{\text{filme}} \text{ (K)}$	$\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^2\text{/s)}$	$\nu \text{ (m}^2\text{/s)}$	Ra_L	Pr	\overline{Nu}_L	$K \text{ (W/(m} \cdot \text{K))}$	$\bar{h} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{K))}$	$\dot{Q} \text{ (kJ/s)}$
300,7	0,00167	2,177E-05	1,587E-05	3,548E+07	0,7288	45,124	0,0257	1,357	0,0023
301,8	0,00166	2,192E-05	1,597E-05	6,700E+07	0,7285	54,401	0,0258	1,641	0,0053
302,9	0,00166	2,207E-05	1,607E-05	9,759E+07	0,7282	60,827	0,0259	1,841	0,0089
303,7	0,00166	2,218E-05	1,615E-05	1,192E+08	0,7280	64,574	0,0259	1,959	0,0116
304,2	0,00166	2,225E-05	1,619E-05	1,311E+08	0,7279	66,436	0,0260	2,018	0,0133
304,1	0,00166	2,225E-05	1,619E-05	1,283E+08	0,7279	66,008	0,0260	2,005	0,0129
304,2	0,00166	2,225E-05	1,619E-05	1,311E+08	0,7279	66,436	0,0260	2,018	0,0133
305,3	0,00165	2,240E-05	1,630E-05	1,597E+08	0,7276	70,485	0,0261	2,148	0,0175
307,7	0,00165	2,273E-05	1,652E-05	2,205E+08	0,7269	77,669	0,0262	2,383	0,0276
306,2	0,00165	2,252E-05	1,638E-05	1,838E+08	0,7273	73,529	0,0261	2,246	0,0213
306,4	0,00165	2,252E-05	1,638E-05	1,879E+08	0,7273	74,015	0,0261	2,261	0,0219
306,2	0,00165	2,252E-05	1,638E-05	1,825E+08	0,7273	73,365	0,0261	2,241	0,0211
305,1	0,00165	2,237E-05	1,628E-05	1,560E+08	0,7276	69,984	0,0260	2,131	0,0169
307,0	0,00165	2,263E-05	1,646E-05	2,036E+08	0,7271	75,822	0,0262	2,321	0,0246
309,1	0,00164	2,289E-05	1,663E-05	2,540E+08	0,7266	81,055	0,0263	2,495	0,0339
306,6	0,00165	2,258E-05	1,642E-05	1,938E+08	0,7272	74,702	0,0261	2,284	0,0230
307,2	0,00165	2,266E-05	1,647E-05	2,071E+08	0,7270	76,216	0,0262	2,335	0,0253
306,9	0,00165	2,263E-05	1,646E-05	1,996E+08	0,7271	75,367	0,0262	2,307	0,0240
306,2	0,00165	2,252E-05	1,638E-05	1,838E+08	0,7273	73,529	0,0261	2,246	0,0213
304,2	0,00166	2,225E-05	1,619E-05	1,325E+08	0,7279	66,648	0,0260	2,024	0,0135
301,9	0,00166	2,193E-05	1,598E-05	6,837E+07	0,7285	54,728	0,0258	1,651	0,0055
Total									0,3649

Tabela 69 - Perdas por convecção pelo teto para o caso 3.

Teto do Secador									
$T_{\text{filme}} \text{ (K)}$	$\beta \text{ (K}^{-1}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^2\text{/s)}$	$\nu \text{ (m}^2\text{/s)}$	Ra_L	Pr	\overline{Nu}_L	$K \text{ (W/(m} \cdot \text{K))}$	$\bar{h} \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{K))}$	$\dot{Q} \text{ (kJ/s)}$
304,3	0,00166	2,225E-05	1,619E-05	1,339E+08	0,7279	76,743	0,0260	2,331	0,0157
306,3	0,00165	2,252E-05	1,638E-05	1,852E+08	0,7273	85,501	0,0261	2,612	0,0249
306,3	0,00165	2,252E-05	1,638E-05	1,852E+08	0,7273	85,501	0,0261	2,612	0,0249
308,3	0,00165	2,280E-05	1,657E-05	2,337E+08	0,7267	92,395	0,0263	2,838	0,0351
309,8	0,00164	2,302E-05	1,672E-05	2,680E+08	0,7263	96,715	0,0264	2,984	0,0433
309,3	0,00164	2,295E-05	1,667E-05	2,567E+08	0,7265	95,327	0,0263	2,937	0,0405
309,3	0,00164	2,295E-05	1,667E-05	2,567E+08	0,7265	95,327	0,0263	2,937	0,0405
310,8	0,00164	2,316E-05	1,681E-05	2,903E+08	0,7261	99,324	0,0265	3,073	0,0489
311,3	0,00164	2,323E-05	1,686E-05	3,012E+08	0,7259	100,553	0,0265	3,116	0,0518
308,8	0,00164	2,288E-05	1,663E-05	2,451E+08	0,7266	93,876	0,0263	2,889	0,0378
313,3	0,00163	2,350E-05	1,705E-05	3,434E+08	0,7254	105,040	0,0266	3,273	0,0637
310,8	0,00164	2,316E-05	1,681E-05	2,903E+08	0,7261	99,324	0,0265	3,073	0,0489
310,3	0,00164	2,309E-05	1,677E-05	2,793E+08	0,7262	98,046	0,0264	3,030	0,0461
313,8	0,00163	2,357E-05	1,710E-05	3,535E+08	0,7253	106,064	0,0267	3,310	0,0667
312,3	0,00163	2,336E-05	1,695E-05	3,226E+08	0,7257	102,878	0,0266	3,197	0,0577
310,8	0,00164	2,316E-05	1,681E-05	2,903E+08	0,7261	99,324	0,0265	3,073	0,0489
312,8	0,00163	2,343E-05	1,700E-05	3,331E+08	0,7256	103,979	0,0266	3,236	0,0607
308,8	0,00164	2,288E-05	1,663E-05	2,451E+08	0,7266	93,876	0,0263	2,889	0,0378
306,3	0,00165	2,252E-05	1,638E-05	1,852E+08	0,7273	85,501	0,0261	2,612	0,0249
305,8	0,00165	2,247E-05	1,634E-05	1,724E+08	0,7274	83,491	0,0261	2,547	0,0225
303,8	0,00166	2,218E-05	1,615E-05	1,206E+08	0,7280	74,118	0,0259	2,248	0,0135
Total									0,8551

Tabela 70 – Perdas por radiação para o caso 3.

Parede do lado do Forno de Chacota			Parede do lado da Contramoldagem			Teto do Secador		
T (°C)	T _{filme} (K)	Q̇ (kJ/s)	T (°C)	T _{filme} (K)	Q̇ (kJ/s)	T (°C)	T _{filme} (K)	Q̇ (kJ/s)
32,1	305,1	-0,160	28,9	301,9	0,015	36	309	0,226
33,2	306,2	-0,151	31,1	304,1	0,033	40	313	0,314
33,8	306,8	-0,146	33,3	306,3	0,051	40	313	0,314
33,9	306,9	-0,145	34,9	307,9	0,064	44	317	0,406
36,4	309,4	-0,124	35,8	308,8	0,072	47	320	0,477
38,5	311,5	-0,106	35,6	308,6	0,070	46	319	0,453
42,4	315,4	-0,071	35,8	308,8	0,072	46	319	0,453
40,7	313,7	-0,087	38	311,0	0,091	49	322	0,526
40,5	313,5	-0,088	42,9	315,9	0,134	50	323	0,550
40,8	313,8	-0,086	39,9	312,9	0,107	45	318	0,430
39,8	312,8	-0,095	40,2	313,2	0,110	54	327	0,651
42,5	315,5	-0,070	39,8	312,8	0,106	49	322	0,526
45,3	318,3	-0,045	37,7	310,7	0,088	48	321	0,501
44,7	317,7	-0,050	41,5	314,5	0,122	55	328	0,677
43,9	316,9	-0,058	45,7	318,7	0,160	52	325	0,600
46,8	319,8	-0,031	40,7	313,7	0,114	49	322	0,526
40,8	313,8	-0,086	41,8	314,8	0,124	53	326	0,626
35,6	308,6	-0,131	41,2	314,2	0,119	45	318	0,430
35,1	308,1	-0,135	39,9	312,9	0,107	40	313	0,314
36,7	309,7	-0,122	35,9	308,9	0,073	39	312	0,292
35,5	308,5	-0,132	31,2	304,2	0,033	35	308	0,204

